МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.М. Аникеенко, А.П. Леонов, А.В. Петров

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

*Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 140611 «Электроизоляционная,
кабельная и конденсаторная техника» направления подготовки 140600
«Электротехника, электромеханика, электротехнологии»*

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 621.315.3(075.8)
ББК 31.232.3я73
А67

Аникеенко В.М.

А67 Обмоточные провода: учебное пособие / В.М. Аникеенко, А.П. Леонов, А.В. Петров; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 190 с.

ISBN 978-5-98298-696-2

В пособии рассматриваются свойства лаков, применяемых для обмоточных проводов с эмалевой, волокнистой, пленочной и пластмассовой изоляцией, современные методы оценки их качества; дано описание технологических процессов эмалирования, тростки, наложения изоляции методом обмотки; приведена оригинальная методика расчета маршрута калибров для эмалирования проволоки, температуры провода и степени запечки эмалевой изоляции.

Предназначено для подготовки магистров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.315.3(075.8)
ББК 31.232.3я73

Рецензенты

Кандидат технических наук
Ю.И. Линин

Начальник научно-технического отдела ОАО «ТомНИКИ»
С.А. Окунев

ISBN 978-5-98298-696-2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Обмоточные провода – это провода, применяемые для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Значительное количество обмоточных проводов используется также в производстве приборов, в различных радиотехнических устройствах, в телевизорах, в авиационной и космической технике и т. д.

Обмоточные провода можно классифицировать:

- *по применяемым проводниковым материалам:* медные, алюминиевые и из сплавов сопротивления. Незначительная часть проводов выпускается с проводниками из биметаллов, драгоценных металлов и из специальных сплавов, в частности сверхпроводящих;
- *по видам изоляции*: обмоточные провода с эмалевой изоляцией, или эмалированные провода; обмоточные провода с волокнистой или комбинированной эмалево-волокнистой изоляцией, в том числе со стекловолокнистой и бумажной; обмоточные провода с пластмассовой изоляцией, включая пленочную. Кроме того, в ограниченном количестве выпускаются обмоточные провода со сплошной стеклянной и стеклоэмалевой изоляцией;
- *по величине рабочей температуры (классу нагревостойкости)*.

Наиболее распространенной группой обмоточных проводов являются эмалированные провода, обладающие существенными преимуществами: более тонкая изоляция позволяет увеличить коэффициент заполнения паза в электрических машинах и аппаратах, повысить их мощность либо снизить габаритные размеры электротехнических устройств при сохранении существующих параметров. Также с точки зрения условий производства эмалированные провода менее трудоёмки по сравнению с проводами, изоляция которых накладывается на проволоку, например, методом обмотки. Поэтому при переходе к выпуску эмалированных проводов производительность труда на кабельных заводах возрастает.

Важной тенденцией в производстве эмалированных проводов является преимущественный рост выпуска тончайших проводов, обусло-

вленный стремлением к микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры и вычислительной техники. Одновременно расширяется производство эмалированных проводов специального назначения, в частности проводов с дополнительным клеящим слоем, используемых для намотки катушек отклоняющих систем телевизоров, а также в производстве обмоток электродвигателей без применения растворителей.

В производстве эмалированных проводов главной проблемой стала необходимость резко уменьшить вредное влияние на окружающую среду с одновременным улучшением условий труда в эмаль-цехах кабельных заводов. Основным направлением работы в этой области является усовершенствование каталитических устройств для сжигания отходящих от эмаль-агрегатов газов, включая установку для каждого или группы эмаль-агрегатов дополнительных дожигателей газов, обеспечивающих требуемую чистоту газов, выбрасываемых в окружающую атмосферу. Важным моментом является также переход на использование эмаль-лаков с менее токсичными растворителями и внедрение технологии эмалирования из расплава смолы без применения растворителей.

Несмотря на то, что в будущем эмалированные провода должны постепенно заменить обмоточные провода с волокнистой изоляцией, работы по усовершенствованию проводов с волокнистой изоляцией ведутся весьма активно. Одной из важнейших задач является снижение толщины изоляции за счет изменения метрического номера применяемых синтетических и стеклянных волокон. Для проводов с бумажной изоляцией главным вопросом всегда является вопрос качества медного или алюминиевого проводника, так как при эксплуатации масляных трансформаторов, в которых эти провода применяются, дефекты проволоки могут вызывать концентрацию напряженности электрического поля и в результате происходят пробой изоляции и межвитковое замыкание.

Обмоточные провода с пленочной изоляцией используются в тяговых электрических машинах, высоковольтных двигателях, электродвигателях погружных насосов нефтедобычи. Высокая нагревостойкость и электрическая прочность обуславливают их высокую надежность в эксплуатации. В ряде случаев пленочная изоляция может быть герметизирована путем спекания при нагреве. Обмоточные провода с пластмассовой изоляцией применяются для намотки погружных электродвигателей насосов водопонижения.

Потребителям обмоточных проводов необходимо знать параметры и свойства обмоточных проводов в целях их правильного и наиболее эффективного использования в изделиях. Одним из важнейших пара-

метров обмоточных проводов является нагревостойкость. Поэтому, несмотря на то что кроме температуры работоспособность проводов зависит и от многих других их свойств, во всем мире прочно установилась классификация обмоточных проводов по длительно допустимой рабочей температуре.

Современное производство обмоточных проводов требует от специалистов кабельных заводов достаточно глубоких знаний в области оборудования и технологии, методов испытаний, применяемых проводниковых и электроизоляционных материалов. Работоспособность обмоточных проводов в составе изделий во многом определяется правильностью их выбора с точки зрения условий и режимов эксплуатации, конструкции изделия, а также зависит от технологии изготовления самого изделия. Срок службы одного и того же провода в составе различных изделий может различаться в несколько раз, даже если температуры эксплуатации близки.

Глава 1
МАТЕРИАЛЫ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

1.1. Медь и алюминий как основные проводниковые материалы, их свойства

Основным проводниковым материалом, используемым для производства обмоточных проводов, является медь. По электрической проводимости медь превосходит все другие материалы, за исключением серебра, что позволяет обеспечивать минимальные габаритные размеры обмоток электрических машин, аппаратов и приборов.

В соответствии с ГОСТ 859–78 медь по химическому составу разделяется на несколько марок. В кабельной промышленности используется только медь повышенной чистоты марок не ниже Ml, М00к, М0к, М0ку, М0об, М0б, М1к, М1б, М1у. Не применяется медь марки М1ф с повышенным содержанием фосфора (0,012...0,06 %), снижающим электрическую проводимость. Кроме того, в производстве обмоточных проводов не может быть использована медь марки М1р, раскисленная фосфором и содержащая его в количестве 0,002...0,012 %, хотя такая медь может использоваться для некоторых других типов кабельной продукции, например лент. Содержание меди вместе с серебром в этих марках меди составляет 99,9...99,99 %. Индексы при марках имеют следующие значения: к, ку – катодная медь, б – бескислородная, у – катодная переплавленная, р и ф – раскисленная. Цифры 00, 0 и 1 определяют содержание меди, причем наибольшее содержание меди имеют марки М00к и М006.

Примеси оказывают неблагоприятное влияние на механические и электрические свойства меди, поэтому медь с содержанием примесей выше 0,1 % в кабельном производстве вообще не используется. Лучшими параметрами с точки зрения применения в производстве обмоточных проводов, и в первую очередь эмалированных, обладает бескисло-

родная медь, почти свободная от содержания кислорода. Она превосходит обычную по пластичности и обеспечивает получение проволоки с лучшим качеством поверхности.

На кабельные заводы медь поступает в слитках (вайербарсах) трапецеидальной формы со скошенными концами, а бескислородная – в слитках прямоугольной формы с закруглениями на углах. Трапецеидальные слитки отливаются в горизонтально расположенные изложницы, открытые сверху, так что поверхность меди не защищена сверху от окисления и контактирует с воздухом. В результате при кристаллизации поверхность слитка становится морщинистой, «рожистой». Это связано с тем, что насыщенный кислородом слой меди имеет большую усадку при остывании по сравнению с основной массой слитка. В поверхностном слое таких слитков допускаются раковины глубиной до 10 мм. Наличие «рожистой» поверхности затрудняет получение при последующих операциях прокатки и волочения медной проволоки с высококачественной поверхностью. Поэтому для получения эмалированных проводов используются так называемые строганые слитки, у которых на медеплавильных заводах снимается верхний слой на глубину 8...12 мм. По химическому составу слитки горизонтальной отливки должны соответствовать меди не ниже марки Ml, причем содержание кислорода не должно превышать 0,06 % (в строганых слитках содержание кислорода не более 0,045 %).

Бескислородная медь, поставляемая в слитках вертикальной непрерывной отливки, не имеет сильно окисленной поверхности. По химическому составу эти слитки должны соответствовать меди не ниже М06, а содержание кислорода в них не превышает 0,0035 %. Слитки вертикальной отливки более однородны по содержанию кислорода и пористости, по механическим свойствам и имеют более высокую плотность.

В соответствии с ГОСТ 193–79 медные слитки для кабельной промышленности выпускаются следующих марок: СВ – слитки вертикальной непрерывной отливки, СН – горизонтальной отливки с не удаленной верхней поверхностью, СС – горизонтальной отливки с удаленной верхней поверхностью.

Вторым по значению металлом в производстве обмоточных проводов является алюминий. Содержание алюминия в земной коре составляет 7,5 %, а меди – около 0,01 %, так что потенциально применение алюминия взамен меди будет расширяться.

Для производства обмоточных проводов применяется алюминий технической чистоты марок А5Е и А7Е по ГОСТ 11069–74. В алюми-

нии технической чистоты содержание марганца должно быть не более 0,01 %, магния – не более 0,02 % и мышьяка – не более 0,015 %; при этом в алюминии марки А5Е допускается содержание кремния до 0,12 % и примесей титана, ванадия, марганца и хрома в сумме до 0,010 % при условии, если обеспечивается регламентируемое значение электрического сопротивления.

Удельное электрическое сопротивление алюминия в 1,62 раза выше, чем меди. Поэтому сечение алюминиевой проволоки с таким же электрическим сопротивлением, как и медной, должно быть в 1,62 раза, а диаметр в 1,27 раза больше, чем медной проволоки. При этом алюминиевая проволока будет в 2 раза легче медной. В настоящее время для производства обмоточных проводов в основном используется катанка, получаемая непосредственно из жидкого металла методом непрерывного литья и прокатки. Основные параметры меди и алюминия приведены ниже.

Таблица 1.1

Основные параметры меди и алюминия

Параметр металла	Медь	Алюминий
Плотность при 20 °С, кг/м^3	8890	2700
Температура плавления, °С	1083	658
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С (отожженная медь, алюминий), Ом·м	$17{,}24 \cdot 10^{9}$	$28 \cdot 10^{9}$
Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления (в диапазоне температур 0...150 °С), °С^{1}	0,0043	0,004
Временное сопротивление при растяжении, МПа / (кгс/мм^2), металла: мягкого твердого	 200 (20) 400 (40)	 80 (8) 160 (16)
Относительное удлинение, %, металла: мягкого твердого	 30 0,6	 30...40 1

Медная проволока круглого сечения, применяемая для производства обмоточных проводов с бумажной, волокнистой, пленочной и пластмассовой изоляцией, изготовляется по ТУ 16.К71.087–90. На круглую медную проволоку, предназначенную для последующего эмалирования, распространяется ОСТ 16.0.505.008–73, который регламентирует целый ряд повышенных требований к качеству проволоки по сравнению с ТУ 16.К71.087–90.

При производстве круглой проволоки используется медная катанка по ОСТ 13842–80, причем проволоку для эмалированных проводов диаметром менее 0,38 мм и свыше 1,25 мм рекомендуется изготовлять из скальпированной заготовки или из катанки, полученной методом непрерывного литья и прокатки. Медная круглая проволока может быть мягкой (марка ММ) и твердой (марка МТ). Проволока для обмоточных проводов изготовляется диаметром 0,015...5,20 мм. Предельные отклонения по диаметру составляют от ±0,002 мм для тончайшей проволоки до ±0,040 мм для проволоки максимальных диаметров. В стандарте на проволоку, предназначенную для последующего эмалирования (максимальный диаметр 2,50 мм), эти допуски более жесткие. Например, для проволоки диаметром 0,31...0,55 мм – 0,003 + 0,004 мм. Кроме того, в этом стандарте оговаривается, что овальность проволоки не должна выходить за предельные отклонения по диаметру.

Одним из дополнительных требований, обеспечивающих повышенное качество проволоки, предназначенной для эмалирования, является отсутствие дефектов (заусенцы, расслаивание, изменение внешнего вида) на проволоке диаметром 0,375 мм и выше после навивания на стержень диаметром, равным диаметру испытываемой проволоки. Проволока, применяемая для изготовления эмалированных проводов, должна храниться не более 15 суток в помещении при 5...35 °С и относительной влажности не более 80 %. При этом она должна быть защищена от механических воздействий, действия солнечных лучей, атмосферных осадков и агрессивных сред.

Удельное электрическое сопротивление круглой медной проволоки постоянному току при 20 °С должно соответствовать значениям, приведенным в табл. 2.

Таблица 1.2

Удельное электрическое сопротивление круглой проволоки

Диаметр проволоки, мм	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, не более для марок	
	ММ	МТ
До 1,0		$18{,}0\cdot10^{9}$
Свыше 1,0 до 2,44 включительно	$17{,}24\cdot10^{9}$	$17{,}8\cdot10^{-9}$
2,5 и более		$17{,}7\cdot10^{9}$

Для круглой медной проволоки марки МТ диаметром свыше 1,0 мм фиксируется минимальное число перегибов, которое составляет в зависимости от диаметра 4–7.

Медная проволока прямоугольного сечения марок ПММ (мягкая) и ПМТ (твердая) изготовляется по ГОСТ 434–78. На медную проволоку прямоугольного сечения, предназначенную для последующего эмалирования, распространяются технические условия ТУ 16-501.021–86, в которых требования к качеству проволоки по сравнению с ГОСТ 434–78 повышены.

Для изготовления прямоугольной медной проволоки применяется медная катанка или сортовой подкат. Если меньшую сторону проволоки обозначить a (толщина), а большую b (ширина), то a находится в пределах 0,80...4,0 мм, а b равно 2,0...30,0 мм. В этом случае сечение выпускаемой прямоугольной проволоки колеблется от 1,5 до 150 мм^2.

Сечения прямоугольной медной проволоки рассчитываются с учетом радиуса закругления углов, которые составляют при размере a до 1,0 мм включительно 0,5, а свыше 1,0 – до 1,60...0,50 мм, свыше 1,60 – до 2,44...0,65 мм, свыше 2,24 – до 3,55...0,80 мм, свыше 3,55 – 1,0 мм. Предельные отклонения размеров проволоки, применяемой в производстве обмоточных проводов, в зависимости от размеров сторон сечения составляют ±(0,02...0,14) мм.

Предельные отклонения линейных размеров прямоугольной медной проволоки, предназначенной для последующего эмалирования, должны находиться в пределах от ±0,02 до +0,06...–0,04 мм.

Механические свойства прямоугольной проволоки должны соответствовать указанным в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Механические свойства проволоки прямоугольного сечения

Размер a, мм	Относительное удлинение, %, не менее для марки ПММ	Временное сопротивление разрыву, МПа, не менее для марки ПМТ
До 0,80 включительно	–	303
Свыше 0,80 до 1,32 включительно	30	303
Свыше 1,32 до 3,335 включительно	32	264
Свыше 3,35 до 7,0 включительно	34	255
Свыше 7,0	35	–

Для прямоугольной медной проволоки, предназначенной для последующего эмалирования, временное сопротивление разрыву должно составлять при размере по стороне a от 0,50 до 2,0 мм включительно не менее 294 МПа, свыше 2,0 мм – не менее 264 МПа.

Испытания прямоугольной медной проволоки на изгиб, предназначенной для последующего эмалирования, проводят на образцах отожженной проволоки (с удлинением не менее 25 %) путем изгиба образца широкой стороной на 180° вокруг стержня диаметром 2*a*, но не менее 4,0 мм три изгиба в одну сторону и три в другую сторону поочередно.

Испытание проволоки, предназначенной для эмалирования с последующим изолированием стеклонитью, проводится путем изгиба вокруг стержня диаметром 8*a*, образцы проволоки изгибают в противоположных направлениях для определения качества поверхности обеих плоскостей проволоки. В результате испытания на поверхности проволоки не должны обнаруживаться отслоения, плены, трещины, заусенцы, видимые невооруженным глазом.

Для производства алюминиевых эмалированных проводов применяется круглая алюминиевая проволока диаметром от 0,08 до 2,50 мм, для обмоточных проводов с другими видами изоляции – круглая проволока диаметром 1,35...8,0 мм и прямоугольная – сечением от 7,5 до 125 мм^2. При производстве эмалированных проводов алюминиевая проволока диаметром менее 0,69 мм предварительно не отжигается, отжиг ее производится непосредственно на агрегатах при эмалировании проволоки. Алюминиевая проволока диаметром выше 0,69 мм должна предварительно отжигаться в отдельных печах, установленных непосредственно на агрегатах. В том случае, если для эмалирования применялась бы твердая алюминиевая проволока, относительное удлинение готового провода составило бы всего 1...3 %. Это заметно затруднило бы намотку обмоток электродвигателей и катушек электроаппаратов и приборов из-за того, что провод с таким удлинением сильно пружинит при укладке.

Круглая алюминиевая проволока, предназначенная для обмоточных проводов, в соответствии с ТУ 16.К71.088-90 изготовляется твердой (марка АТ) и мягкой (марка АМ). Проволока изготовляется из алюминиевой катанки и выпускается в диапазоне диаметров от 0,08 мм и выше. В зависимости от диаметра проволоки предельные отклонения ее размеров колеблются от ±0,004 до ±0,08 мм.

Удельное электрическое сопротивление мягкой алюминиевой проволоки не должно превышать $28\cdot10^{-9}$ Ом·м, твердой и полутвердой – $28{,}3\cdot10^{-9}$ Ом·м. Механические свойства проволоки марок АТ и АМ должны соответствовать указанным в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Механические свойства проволоки марок АТ и АМ

<table>
<tr><th rowspan="2">Диаметр проволоки, мм</th><th colspan="2">АТ</th><th colspan="2">АМ</th></tr>
<tr><th>Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/мм²), не менее</th><th>Относительное удлинение, %, не менее</th><th>Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/мм²), не менее</th><th>Относительное удлинение, %, не менее</th></tr>
<tr><td>от 0,08 до 0,10</td><td>98 (10)</td><td rowspan="2">0,5</td><td rowspan="2">–</td><td rowspan="2">–</td></tr>
<tr><td>0,10...0,30</td><td>117 (12)</td></tr>
<tr><td>0,30...0,50</td><td>157 (16)</td><td>0,7</td><td rowspan="8">73,5...98 (7,5...10)</td><td rowspan="3">10</td></tr>
<tr><td>0,50...0,60</td><td>176 (18)</td><td rowspan="3">1,0</td></tr>
<tr><td>0,60...1,00</td><td rowspan="5">167 (16,5)</td></tr>
<tr><td>1,00...1,50</td><td>15</td></tr>
<tr><td>1,50...2,50</td><td>1,3</td><td>18</td></tr>
<tr><td>2,50...4,0</td><td>1,5</td><td>20</td></tr>
<tr><td>4,0...5,0</td><td rowspan="2">2,0</td><td rowspan="2">25</td></tr>
<tr><td>5,0...10,0</td><td>147 (15)</td></tr>
</table>

Твердая алюминиевая проволока диаметром более 1,5 мм выдерживает без разрушения 7–8 перегибов. Проволока марки АТ диаметром менее 1,5 и более 5,1 мм, а также мягкая проволока на перегиб не испытываются.

Прямоугольная алюминиевая проволока, предназначенная для обмоточных проводов и других электротехнических целей, изготовляется по ТУ 16-705.451–87.

Проволока изготовляется как твердой (марка ПАТ), так и мягкой (марка ПАМ). Номинальные размеры проволоки по большой стороне b находятся в пределах от 2,0 до 18,0 мм, по меньшей стороне a – от 0,8 до 5,6 мм. Диапазон сечений выпускаемой прямоугольной алюминиевой проволоки – от 1,5 до 100 мм².

Для изготовления проволоки применяется алюминиевая катанка. Проволока имеет закругленные углы, причем в зависимости от размеров проволоки радиус закругления составляет 0,5...1,0 мм. Радиус закругления прямоугольной алюминиевой проволоки, имеющей размер a до 1 мм включительно, $0,5a$. Механические свойства проволоки должны соответствовать приведенным ниже параметрам.

Таблица 1.5

Механические свойства прямоугольной алюминиевой проволоки

Сечение проволоки, мм^2	Марка проволок			
	ПАТ		ПАМ	
	Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/мм^2), не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/мм^2), не менее	Относительное удлинение, %, не менее
До 30 включительно	130 (133)	1,5	70 (71)	25
Свыше 30	122 (124)	2,0	60,6 (62)	26

1.2. Проводниковые материалы для проводов повышенной нагревостойкости

Для производства обмоточных проводов, кроме меди и алюминия, довольно широко применяются также сплавы высокого электрического сопротивления – манганин, константан и нихром. Провода из сплавов сопротивления необходимы для электроизмерительных и электронагревательных приборов, образцовых резисторов, реостатов. Во всех этих случаях применяемый сплав должен иметь высокое электрическое сопротивление, а в некоторых случаях и минимальный температурный коэффициент электрического сопротивления. Специфическим требованием, предъявляемым к сплавам сопротивления, является малая термоЭДС по отношению к меди. Манганин относится к группе медно-никелевых сплавов (ГОСТ 492–73) и содержит кроме меди и никеля марганец. Примерный состав манганина марки МНМц 3-12: марганец 11,5...13,5 %; никель (с кобальтом) 2,5...3,5 %; остальное – медь. Содержание примесей, среди которых главной является железо, не должно превышать 0,72 %.

Константан имеет те же компоненты, что и манганин, только содержатся они в других соотношениях (константан марки МНМц 40-1,5): никель (с кобальтом) – 39...41 %; марганец – 1,0...2,0 %; остальное – медь. Допустимое содержание примесей, как и для манганина, 0,77 %.

Сплавы, имеющие общее название нихромы, состоят из никеля, хрома и железа (ГОСТ 10994–74). В производстве обмоточных проводов, как правило, используются двойные сплавы никеля и хрома.

Основные параметры манганина, константана и нихрома приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Основные параметры манганина, константана и нихрома

Параметр	Манганин МНМц 3-12	Константан МНМц 40-1,5	Нихром Х20Н80
Плотность при 20 °С, кг/м^3	8400	8900	8400
Температура плавления, °С	960	1250	1380...1420
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м	$(0,47...0,48)\cdot10^{-6}$	$(0,45...0,52)\cdot10^{6}$	$(1,04...1,15)\cdot10^{6}$
Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, °С ^{1}	$10\cdot10^{-6}$	$(-20...+60)\cdot10^{6}$	$(100...104)\cdot10^{6}$
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	450...550	450...650	620...680
Относительное удлинение при разрыве, %	25	15...20	20
ТермоЭДС в паре с медью, мкВ/°С	1,0	40...50	–

Кабельные заводы не производят прокатки и грубого волочения сплавов сопротивления. Обычно они получают заготовку из манганина и константана в виде проволоки диаметром 0,8...2,4 мм, а затем подвергают ее волочению до требуемого размера. Нихромовая проволока поступает на кабельные заводы в готовом виде. После волочения проволока из сплавов сопротивления может подвергаться вакуумному отжигу. Отжиг манганиновой проволоки, в частности, производится при 450...650 °С и вакууме приблизительно 0,5 кПа в течение 2 часов.

Проволока из манганина в кабельной промышленности изготовляется в диапазоне диаметров от 0,02 до 0,9 мм (ГОСТ 10155–75). Предельные отклонения диаметра составляют: ±0,003 мм для проволоки диаметром 0,02...0,03 мм; ±0,005 мм для 0,04...0,09 мм; ±0,013 мм для 0,10...0,15 мм; ±0,02 мм для 0,16...0,30 мм; ±0,025 мм для 0,035...0,60 мм; ±0,03 для 0,63...0,90 мм. Если проволока используется для последующего эмалирования (диаметр не более 0,8...0,9 мм), то предельные отклонения, как правило, составляют ±0,05 мм. Заготовка из манганина диаметром свыше 0,9 мм имеет предельные отклонения ±0,08 мм. Проволока из манганина может изготовляться как твердой, так и мягкой. Удельное электрическое сопротивление твердой проволоки должно составлять $(0,48 \pm 0,05)\cdot10^{-6}$ Ом·м, мягкой $(0,47 \pm 0,05)\cdot10^{-6}$ Ом·м.

Электрическое сопротивление манганиновой проволоки R_t в зависимости от температуры в пределах от 10 до 40 °С вычисляется по формуле

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha[t - 20] + \beta[t - 20]^2), \qquad (1.1)$$

где R_{20} – сопротивление при 20 °С; α и β – температурные коэффициенты, которые, как правило, определяются по требованию потребителя, оговоренному в заказе. Коэффициенты α и β для мягкой манганиновой проволоки для отожженных образцов должны соответствовать указанным ниже.

Таблица 1.7

Температурные коэффициенты манганиновой проволоки

Марка манганина	α, 10^{6}/°С^{1}	β, 10^{6}/°С^{1}
МНМцАЖ 3-12-0,3-0,3	от –2 до +10	от –1,5 до +0,5
МНМи 3-12	от +10 до +25	0

Относительное удлинение твердой манганиновой проволоки – не более 9 %, мягкой – не менее 10...15 %. Наибольшая допустимая рабочая температура манганиновой проволоки составляет 300 °С. Константановая проволока (ГОСТ 5307–77) изготовляется из константана марки МНМц 40-1,5 и может быть как твердой (диаметром 0,09 мм и менее), так и мягкой (диаметром свыше 0,09 мм). Удельное электрическое сопротивление мягкой проволоки должно составлять $(0{,}465 \pm 0{,}015)\cdot 10^{6}$ Ом·м, твердой – $(0{,}490 \pm 0{,}030)\cdot 10^{6}$ Ом·м. Зависимость электрического сопротивления константановой проволоки от температуры определяется только одним коэффициентом α (т. е. $R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$), который, как указывалось, в диапазоне температур 20...100 °С находится в пределах от –2 до $+6\cdot 10^{-5}$ °С$^{-1}$.

Константановая неизолированная проволока предназначена для эксплуатации при температуре не выше 500 °С.

Нихромовая проволока (ГОСТ 8803–89) изготовляется в диапазоне диаметров 0,09...0,40 мм. Как правило, нихромовая проволока поставляется в мягком состоянии со стабильными свойствами по электрическому сопротивлению. Проволока, поставляемая для производства эмалированных проводов, имеет чистую блестящую поверхность без следов оксидов и остатков смазки от волочения. Проволока диаметром 0,09 мм и тоньше изготовляется из сплава марки Х20Н80 с пониженным содержанием углерода (до 0,06 %). Она не должна содержать неметаллических и карбидных включений. Проволока диаметром

0,10 мм и выше изготовляется из сплавов марок Х20Н80 и Х15Н60. Удельное электрическое сопротивление проволоки из сплава Х20Н80 составляет (1,02...1,12)$\cdot 10^6$ Ом·м, из сплава Х15Н60 – (1,06...1,16)$\cdot 10^6$ Ом·м. Относительное удлинение нихромовой проволоки, предназначенной под эмалирование, возрастает с увеличением диаметра и составляет от 4 до 20 %.

1.3. Конструкции и свойства токопроводящих жил для проводов повышенной нагревостойкости

Роль проводниковых материалов, с точки зрения обеспечения надежности эксплуатации обмоточных проводов, значительно возрастает при повышенных температурах. Проводники для обмоточных проводов высокой нагревостойкости должны обладать достаточно высокой электропроводностью, быть стойкими при повышенных температурах к окислению на воздухе, у них должно минимально увеличиваться в процессе эксплуатации электрическое сопротивление. От проводниковых материалов, кроме того, требуется способность в известной степени сохранять свои механические параметры в процессе эксплуатации при высоких температурах на воздухе и в вакууме. Проводниковые материалы не должны также оказывать каталитического воздействия на тепловое старение изоляции проводов или диффундировать в изоляционное покрытие. Последнее обстоятельство особенно важно при рабочих температурах, превышающих 600 °С.

Основными процессами, протекающими при повышенных температурах в проводниках для нагревостойких обмоточных проводов и обусловливающими изменения их параметров, являются окисление и диффузия. Медь, которая служит проводниковым материалом для многих проводов, предназначенных для эксплуатации, при температуре свыше 225 °С начинает интенсивно окисляться на воздухе; это вызывает резкое увеличение электрического сопротивления проводника, приводит к снижению эластичности, а затем и к отслаиванию изоляционного покрытия. Для устранения этого недостатка медь защищают от окисления нанесением покрытия из другого металла либо заменяют медь более жаростойкими сплавами или металлами.

Наиболее распространенным способом защиты медной проволоки от окисления является нанесение защитного слоя никеля, причем никель может наноситься как методом плакирования, так и гальванически. При использовании метода плакирования медная заготовка за-

тягивается в никелевую трубу и подвергается последовательным операциям волочения и отжига до получения биметаллической проволоки требуемого размера. Никелевое покрытие в этом случае имеет достаточно большую толщину и надежно защищает медь от окисления. Биметаллическая проволока такого типа может длительно работать при 400 °С (за исключением проволоки тончайших размеров) и в течение ограниченного времени – при 650 °С.

Биметаллическая проволока Cu-Ni для обмоточных проводов выпускается диаметром от 0,10 до 2,50 мм. Ее электрическая проводимость при наложении никеля методом плакирования составляет примерно 80 % электрической проводимости меди. Примерно при 400 °С начинает проявляться взаимная диффузия металлов сердечника и покрытия, что приводит к росту электрического сопротивления проводов, особенно заметному у проводов малых диаметров.

При 500...600 °С взаимная диффузия меди и никеля протекает с большей скоростью. Это явление сочетается с ростом зерен медного сердечника и окислением никелевой оболочки. В результате при 600 °С у биметаллической проволоки Cu-Ni не только растет электрическое сопротивление, но и заметно ухудшаются механические параметры. Никелевые покрытия могут наноситься на медную проволоку также электрохимическим способом. Преимущество гальванических покрытий заключается в том, что они не выводят проволоку из пределов положительных допусков по наружному диаметру, так как толщина их невелика (1...5 мкм в зависимости от условий эксплуатации проводов). Сопротивление проволоки с такими защитными покрытиями в исходном состоянии практически не отличается от сопротивления незащищенной проволоки. Однако защитное действие гальванических покрытий слабее, чем покрытий той же толщины, наложенных методом плакирования, вследствие большей плотности последних. Поэтому медная никелированная проволока с гальваническим покрытием применяется для более низких температур эксплуатации или для сокращенных по сравнению с проволокой с плакированными покрытиями сроков службы.

Механизм окисления поверхности медной проволоки с гальваническими покрытиями, в том числе никелевыми, сводится к следующему. Так как в гальванических покрытиях всегда имеются поры, то кислород воздуха проникает к поверхности меди и окисляет ее. Образовавшаяся оксидная пленка имеет больший объем по сравнению с объемом неокислившегося металла. Это приводит к возникновению в покрытии растягивающих напряжений, покрытие трескается, возникает

возможность его окисления. При более высоких температурах может окисляться и само гальваническое покрытие.

Степень окисления поверхности проводника при эксплуатации в воздушной среде, определяющая изменение электрического сопротивления, зависит также от наличия и типа изоляции провода. Даже в тех случаях, когда провод работает в вакууме или в инертной среде и окисление поверхности проводника отсутствует, применение гальванических покрытий целесообразно для защиты поверхности меди или жаропрочного медного сплава в процессе выполнения технологических операций, проводимых, как правило, в воздушной среде.

Лучшей коррозионной стойкостью при высоких температурах обладают двойные покрытия (хром-никель, железо-никель), последовательно наносимые на проволоку. Естественно, что в этом случае технологические процессы наложения защитных покрытий несколько усложняются. При этом промежуточный слой из железа или хрома не только усиливает общее защитное антиокислительное действие покрытия, но и играет роль антидиффузионного барьера между сердечником и слоем никеля.

Для уменьшения диффузии металла защитного слоя в сердечник в качестве оболочки целесообразно применять металлы, обладающие меньшим коэффициентом диффузии в медь, а также, как указывалось выше, для этой цели разрабатываются триметаллические проводники, имеющие промежуточную металлическую прослойку между сердечником и оболочкой. Хорошие результаты дает замена медного сердечника серебряным или из специальных сплавов с достаточно высокой электропроводностью. Применение специальных сплавов необходимо также и тогда, когда провода при повышенных температурах подвергаются значительным механическим воздействиям (ударные нагрузки, вибрации).

Основными материалами биметаллических проводников для обмоточных проводов, работающих на воздухе при температурах около 600...700 °С, являются серебро-никель и медь-нержавеющая сталь, а триметаллических проводников – медь-железо-никель или медь-железо-инконель. Инконель представляет собой сплав с содержанием 79,92 % Ni, 15,5 % Cu, 7,5 % Fe и 0,08 % C. Эти же проводники могут обеспечивать работу в течение значительно более длительного времени при 500 °С, чем биметаллическая проволока Cu-Ni.

Сопротивление проводников малых диаметров с никелевой оболочкой, нанесенной как гальваническим путем, так и плакированием,

возрастает на 10 % (предельно допустимое увеличение сопротивления) довольно быстро. При наличии изоляции скорость окисления проводника с гальваническим покрытием резко замедляется.

У проводника диаметром 1,02 мм с никелевым гальваническим покрытием увеличение сопротивления остается в пределах допуска (10 %) в течение 600 ч. Сопротивление медных проводников, плакированных никелем, диаметром 1,02 мм возрастает в этом случае на 1,5 % и далее заметно не меняется в течение еще 600 ч при 500 °С. Сопротивление проволоки «куфеник» (медь-железо-никель) диаметром 0,25 мм возрастает в начальный период на 3 % и остается в дальнейшем на этом уровне. Это указывает на возможность длительной эксплуатации такой проволоки при 500 °С. У провода такого же типа диаметром 1,02 мм сопротивление уменьшается (за счет отжига) за 600 ч на 4 %. Подобное явление наблюдается у медных проводников, плакированных нержавеющей сталью, и у серебряных, плакированных никелем.

Удельное электрическое сопротивление биметаллической проволоки медь-нержавеющая сталь диаметром 0,30...0,80 мм обычно не более $0{,}026 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, диаметром 0,81...2,50 – не более $0{,}025 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, что составляет около 70 % электрической проводимости меди.

При 500...600 °С электрическое сопротивление проволоки медь-нержавеющая сталь в первые сутки уменьшилось, что объясняется дополнительным отжигом проволоки. При 700 °С взаимная диффузия металлов сердечника и оболочки весьма значительная, так что снижение электрического сопротивления проводника за счет отжига перекрывается увеличением его за счет диффузии.

Длительный нагрев проволоки медь-нержавеющая сталь в течение 2000 ч при 600 °С вызывает увеличение сопротивления на 40...80 % с последующей стабилизацией этого значения. Резкое возрастание электрического сопротивления медной проволоки с оболочкой из нержавеющей стали при 700 °С (в 2–3 раза) практически исключает возможность ее применения в обмоточных проводах при этой температуре. Разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение исследованных образцов остаются неизменными при воздействии температуры 500 °С и снижаются в процессе пребывания их при 600...700 °С. Однако и после этого снижения параметры остаются достаточно высокими.

Биметаллическая проволока Ag-Ni может изготовляться диаметром от 0,10 до 2,50 мм с удельным электрическим сопротивлением 0,023...0,021 мкОм·м (75...82 % проводимости меди).

Электрическое сопротивление проволоки диаметром 0,5 мм после выдержки при повышенных температурах изменяется незначительно (увеличивается на 7,4 % после выдержки в течение 2300 ч при 600 °С), но механические параметры ее претерпевают заметные изменения. Разрушающее напряжение при растяжении через 80 суток снижается вдвое при одновременном уменьшении относительного удлинения.

Образцы проволоки Ag-Ni становятся хрупкими и легко ломаются при испытаниях после 50 суток пребывания при 600 °С. Эти явления, вероятно, связаны с начинающимся окислением никелевой оболочки. Оболочка из нержавеющей стали является более жаростойкой. После длительного воздействия температур 600...700 °С на такой оболочке какие-либо изменения визуально не обнаруживаются.

Анализируя результаты испытаний проводников медь-нержавеющая сталь и Ag-Ni, можно сделать выводы о возможности их длительной эксплуатации при 500 °С. Что касается эксплуатации при 600 °С, то для биметаллической проволоки медь-нержавеющая сталь этот срок составляет около 1000 ч, а для проволоки Ag-Ni – около 2000...3000 ч. Если провод с жилой из Ag-Ni не будет подвергаться в процессе эксплуатации значительным механическим воздействиям, то длительность работы может быть увеличена. В связи с тем, что увеличение сопротивления биметаллической проволоки в процессе пребывания ее при повышенных температурах определяется взаимной диффузией металлов сердечника и оболочки, которая, естественно, не зависит от характера окружающей среды, сроки службы биметаллических проводников как на воздухе, так и в вакууме примерно одинаковы. Это утверждение справедливо, конечно, при отсутствии трещин в оболочке. В противном случае воздух легко проникает сквозь трещины к сердечнику и вызывает его окисление и разрушение.

Для увеличения сроков службы при 600...700 °С в качестве оболочки серебряного сердечника могут применяться никелевые сплавы. В этом случае удельное электрическое сопротивление биметаллического проводника составляет около $0{,}025 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Проведенные исследования изменения сопротивления биметаллических проволок от времени пребывания при температурах 700...750 °С показали: разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение проволоки Ag-Ni-сплав снижаются на 20 %, а проволоки Ag-Ni – на 50 %. У биметаллических жил с медным сердечником при такой температуре наблюдается заметный рост электрического сопротивления в результате взаимной диффузии металлов сердечника и оболоч-

ки, окисления поверхности медного сердечника, а также окисления поверхности никелевой оболочки.

При 750 °С у биметаллической проволоки Cu-Ni электрическое сопротивление увеличивается еще более резко. Одновременно проволока становится хрупкой на вторые сутки старения. Увеличение электрического сопротивления наблюдается также у проволоки Ag-Ni: через 720 ч сопротивление возрастает на 12 %, а разрушающее напряжение при растяжении уменьшается в 2 раза. Одновременно проволока становится хрупкой. Добавка к никелю специальных присадок заметно уменьшает взаимную диффузию металлов сердечника и оболочки. В этом случае увеличения электрического сопротивления у проволоки из Ag-Ni-сплава не наблюдается, хотя на поверхности проволоки появляется слой оксидов, а разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение ее несколько уменьшаются.

Для дальнейшего повышения нагревостойкости вводят между медью и защитным слоем промежуточный слой из тантала или ниобия, что заметно замедляет увеличение электрического сопротивления проводников в процессе эксплуатации. Для температур выше 750 °С необходимо ввести еще один слой из чистой меди между слоями из тантала или ниобия и защитным слоем. При длительном нагреве выше 750 °С на поверхности медного сердечника возникают неровности, которые вызывают растрескивание промежуточного и защитного слоев. Для предупреждения этого явления в медь вводится около 0,1...2 % оксида алюминия. У такой проволоки в процессе пребывания при повышенных температурах электрическое сопротивление увеличивается в меньшей степени, чем у биметаллической проволоки с защитными слоями из никеля, нержавеющей стали и инконеля.

Одним из способов устранения взаимной диффузии металлов сердечника и оболочки в биметаллических проводниках является также введение разделительного слоя из тугоплавких оксидов, например оксида магния и оксида алюминия. Наличие в проволоке слоя порошка усложняет процесс волочения, вызывая более частые обрывы. Для получения такой проволоки в никелевую трубу вставляется медный пруток, а зазор между прутком и внутренней стенкой заполняется порошком оксида. Далее происходит волочение с промежуточными отжигами. Наличие гигроскопического сыпучего слоя требует сушки порошка перед засыпкой его в заготовку. Отсутствие этой операции приводит при отжиге к разрыву оболочки вследствие парообразования в сыпучем слое. У такой проволоки с наружным диаметром 2,0 мм после пребывания

при температуре 900 °С в течение нескольких тысяч часов электрическое сопротивление не изменилось. Однако технология получения таких проводников крайне сложна.

Другим путем решения проблемы создания проводников для обмоточных проводов на сверхвысокие температуры являются разработка специальных медных сплавов и введение в медь упрочняющих добавок.

При температуре свыше 650 °С происходит интенсивная кристаллизация меди. В медной проволоке, нагреваемой до 850 °С в течение 24 ч в атмосфере аргона, образуются зерна, видимые невооруженным глазом. Они могут достигать размеров, равных поперечному сечению проводника диаметром 1,02 мм. В результате резко снижаются разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение, что приводит к повреждению проводника даже при легком его изгибе. Поэтому для эксплуатации при 650 °С и выше медь без дополнительного легирования не пригодна для работы даже в вакууме или инертной среде.

Для преодоления трудностей, вызываемых рекристаллизацией при очень высоких температурах, применяется усиление металлов дисперсионными добавками. Добавки неорганических оксидов, таких как диоксид кремния SiO_2, глинозем $A1_2O_3$, диоксид циркония ZrO_2, оксид бериллия BeO, способствуют сохранению механических параметров меди при температуре, отличающейся только на 100 °С от температуры плавления.

Известно также упрочнение меди тугоплавкими сплавами. Для этого применяется сочетание порошкообразной меди и 3–15%-го порошка одного из тугоплавких сплавов (или оксидов), точка плавления которых выше точки плавления меди и которые при тепловой обработке не вступают в прямую реакцию с медью.

Сплавы дисперсионного упрочнения, получаемые методом порошковой металлургии, например меди с оксидом алюминия или бериллия, могут дополнительно упрочняться за счет введения в проводник высокопрочных материалов в форме тонких нитей, как без ориентации, так и с ориентацией в одном направлении. В качестве упрочняющих нитей используются тонкая проволока, неметаллические нити или нитевидные кристаллы с высоким разрушающим напряжением. В частности, может применяться проволока диаметром 0,025...0,45 мм из вольфрама, молибдена или стали, составляющих до 50 % основного материала проводника. Медная проволока, содержащая 50 % (по объему) вольфрамовых нитей диаметром 0,254 мм, расположенных параллельно ее оси, имеет разрушающее напряжение при растяжении свыше

1235 МПа и электрическую проводимость, равную около 65 % проводимости чистой меди. Из неметаллических нитевидных материалов применяются аморфные и кристаллические вещества (стекло, кварц, графит, карбид кремния, нитрид бора и бор). Поверхность нитей из этих материалов не должна иметь повреждений, для чего принимаются специальные меры.

Легирование меди, как правило, увеличивает ее жаропрочность, т. е. способность сохранять на определенном уровне механические параметры во время пребывания при повышенных температурах. В то же время, несмотря на некоторое снижение электрической проводимости, сплавы меди имеют температурный коэффициент сопротивления меньший, чем у меди. Поэтому при 500...600 °С сплавы меди не только сравниваются по электрической проводимости с медью, но даже могут превосходить ее.

Жаростойкие сплавы подобного типа находят применение при изготовлении обмоточных проводов в отечественной практике, например сплав на основе меди марки БрХНб. Обладая высокой электрической проводимостью в исходном состоянии (90 % электрической проводимости меди), этот сплав имеет меньший температурный коэффициент сопротивления, чем медь. В результате при рабочих температурах около 500...600 °С по электрической проводимости сплав БрХНб превосходит медь. В связи с высокой жаропрочностью проволока из сплава БрХНб пока незаменима для обмоточных проводов, эксплуатируемых при температуре 600...700 °С в инертной среде или вакууме.

Особый интерес представляют проводниковые материалы, которые могут работать при 1000 °С и выше. Золото без дополнительных покрытий может применяться для работы при 1000 °С, однако золотой проводник примерно в 30 раз дороже серебряного с никелевым покрытием и в 150 раз дороже медного с плакированием нержавеющей сталью. Платина (температура плавления 1773 °С) – наиболее подходящий материал для использования в диапазоне особо высоких температур.

Для сверхвысоких температур до 1400 °С в будущем могут найти применение в качестве проводниковых материалов также некоторые соединения типа боридов, нитридов и т. п.

Если для обмоточных проводов применяются биметаллические токопроводящие жилы, увеличение их сопротивления в процессе эксплуатации в основном объясняется взаимной диффузией металлов сердечника и оболочки. Образующиеся в результате диффузии твердые растворы или другие соединения, как правило, обладают удельным со-

противлением, значительно превышающим сопротивление чистых металлов, что и приводит к росту электрического сопротивления обмоток машин и аппаратов.

Для расчета увеличения сопротивления биметаллических обмоточных проводов при повышенных температурах может быть применен метод, включающий три этапа:

1) определение глубины взаимного проникновения металлов сердечника и оболочки и распределения концентрации обоих металлов;
2) вычисление электрического сопротивления промежуточной диффузионной зоны;
3) вычисление общего увеличения сопротивления провода с учетом возрастания сопротивления сердечника и защитной оболочки.

Так как для биметаллической проволоки в качестве защитной оболочки всегда выбирается более жаростойкий металл (никель, инконель, нержавеющая сталь и т. п.), то окисление оболочки и связанное с ним увеличение сопротивления можно не учитывать.

Глава 2
ЛАКИ ДЛЯ ЭМАЛИРОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ

2.1. Назначение и классификация лаков

Электроизоляционные лаки, применяемые для эмалирования проволоки, представляют собой растворы высокомолекулярных пленкообразующих соединений или низкомолекулярных реакционноспособных олигомеров в органических летучих жидкостях. При нагревании эмаль-лака в эмаль-печи молекулярная масса пленкообразующих еще более возрастает, а растворитель испаряется, в результате чего на проволоке образуется твердая эмалевая пленка. В качестве пленкообразующих применяются различные синтетические смолы, а также некоторые растительные масла. Растворы пленкообразующих в том или ином растворителе могут иметь различную концентрацию в зависимости от растворимости лаковой основы.

Эмаль-лаки могут иметь синтетическую или масляно-смоляную основу. Синтетические лаки образуют на проволоке более прочные и нагревостойкие эмалевые пленки, поэтому они практически вытеснили из производства проводов лаки на масляно-смоляной основе, в которых к тому же используются остродефицитные растительные масла. Так, в настоящее время более 95 % всех эмалированных проводов изготовляется с применением синтетических лаков. В общем виде требования, предъявляемые к эмаль-лакам, представлены на рис. 2.1.

2.2. Лаки для проводов с температурным индексом 105 °С

В качестве изоляционных покрытий эмалированных проводов наиболее широко применяются покрытия на основе поливинилацеталевых лаков.

Поливинилацетали представляют собой продукты взаимодействия поливинилового спирта с различными альдегидами (формальдегид,

ацетальдегид, масляный альдегид и др.). В зависимости от типа применяемого альдегида поливинилацетали называются поливинилформалями, поливинилэтилалями, поливинилбутиралями и т. п. Поливинилацетали используются в качестве пленкообразующих эмаль-лаков. Самый распространенный в отечественной практике поливинилацеталевый лак – это лак ВЛ-931, или винифлекс. Он представляет собой раствор поливинилформальэтилалевой и резольной фенолформальдегидной смол в смеси технического хлорбензола и этилцеллозольва в соотношении 1 : 1.

Пленка лака винифлекс не плавится и не размягчается при нагреве (термореактивный полимер), но в то же время она достаточно гибка и эластична, обладает высокой механической прочностью на истирание.

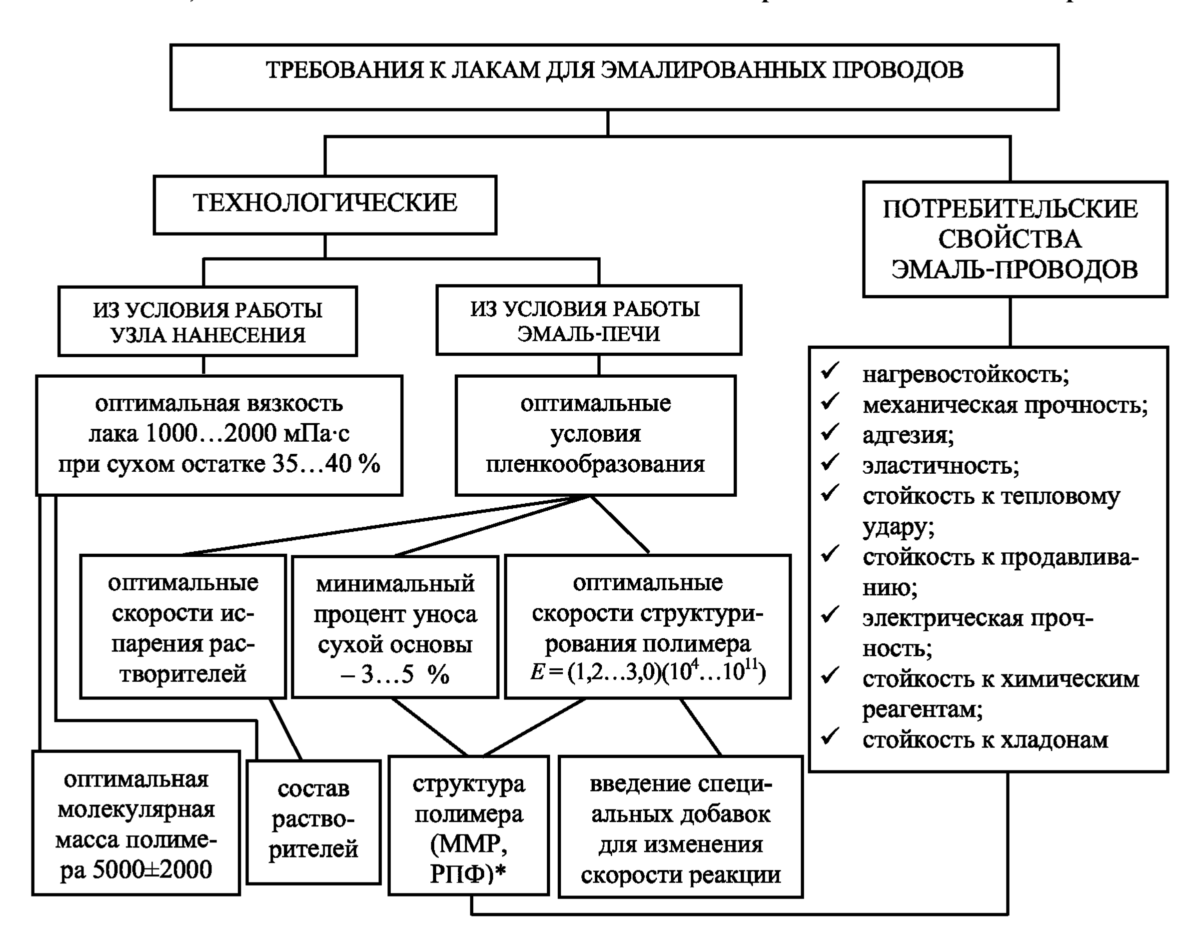


Рис. 2.1. Общие требования к эмаль-лакам

Другим представителем поливинилацеталевых лаков, применяемых в отечественной практике, является лак ВЛ-941, или метальвин. Лак метальвин – это раствор поливинилформалевой и фенолформальдегидной смол в массовом соотношении 2 : 1 с добавкой стабилизатора – триэтаноламина.

Образующаяся пленка по своим электроизоляционным и механическим свойствам не отличается от пленки лака винифлекс, но превосходит последнюю по стойкости к воздействию органических растворителей и воды.

За рубежом лаки для эмалирования проволоки на основе поливинилформалевых смол известны под названием формекс, формвар, формадур и т. п. Эти лаки отличаются от отечественных составом модифицирующих агентов, а также частично способами получения и составом основной смолы.

2.3. Лаки для проводов с температурным индексом 120 °С

Полиуретановые лаки применяются для эмалирования проводов с температурным индексом 120 °С. Полиуретаны представляют собой продукт взаимодействия диизоцианатов с соединениями, содержащими две или более гидроксидных групп.

Отечественный лак УР-973 получают путем взаимодействия монофенилуретана, фенольной и полиэфирной смолы с добавками поливинилацеталевой смолы. Небольшие добавки поливинилформальэтиталя улучшают растекаемость лака и повышают качество поверхности провода.

Разработанный в последнее время для эмалирования проволоки малых диаметров полиуретановый лак марки УП-9119 обладает рядом преимуществ перед лаком УР-973. Дополнительное введение в лак 0,3 % нафтената цинка ускоряет процесс отверждения в процессе тепловой обработки покрытия на проволоке. Покрытия на основе лака УР-9119 обладают повышенной стойкостью против слипания.

2.4. Лаки для проводов с температурным индексом 130...180 °С

Для производства эмалированных проводов с ТИ 130, 155 и 180 используются лаки на полиэфирной, полиэфиримидной, полиэфирциануратимидной и полиэфирамидимидной основе. Эта группа лаков в настоящее время является основной как в нашей стране, так и за рубежом.

В отечественной практике используются два полиэфирных лака, различающихся по способу получения, ПЭ-943А и ПЭ-939.

Несмотря на относительно высокую нагревостойкость, изоляция на основе полиэфирных лаков обладает специфическим недостатком – пониженной стойкостью к тепловому удару, которая заключается в том,

что при растяжении или изгибе провода до определенной степени резкое кратковременное воздействие повышенной температуры может привести к растрескиванию изоляции. В целях улучшения стойкости эмалированных проводов с полиэфирной изоляцией к тепловым ударам при одновременном повышении нагревостойкости используются модифицированные полиэфирные лаки.

Модифицированные полиэфирные лаки были разработаны для повышения нагревостойкости изоляции эмалированных проводов, механической прочности ее на истирание, стойкости к действию теплового удара и некоторых растворителей. Для модифицирования полиэфирных смол используются производные изоциануровых кислот.

Нагревостойкость изоляции на основе полиэфирциануратных лаков составляет 155...180 °С.

Основными типами модифицированных полиэфирных лаков являются полиэфиримидные и полиэфирцифрануратимидные. Полиэфиримиды – это нагревостойкие полимеры, содержащие имидные, эфирные группы и ароматические циклы. В отечественной практике полиэфиримидный лак имеет марку ПЭ-955 и представляет собой продукт, получаемый из диметилтерефталата, этиленгликоля, глицерина, тримеллитового ангидрида и диаминодифенилметана.

Полиэфирциануратимидный лак марки ПЭ-999 – это раствор полиэфирциануратимидной смолы на основе диметилтерефталата, этиленгликоля, ТГЭИЦ, тримеллитового ангидрида и 4,4-диаминодифенилметана в смеси трикрезола и ксилола.

Отечественный лак ИД-9142 отличается от лака ПЭ-999 повышенным содержанием имидной части. Покрытие на основе лака ИД-9142 обладает повышенной прочностью на истирание, адгезией, температурой продавливания изоляции, стойкостью к тепловому удару.

Для производства эмаль-проводов марки ПЭВТЛ-155 предложен полиуретановый лак УР-155К, содержащий до 28...32 % нелетучей части, в композиции крезола, сольвента, ксилола, с вязкостью 25...50 по ВЗ-246.

На класс нагревостойкости Н используются лаки ПИ-180ФА и ПИ-180ФБ, химической основой которых является полиимид алициклического строения. Пробивное напряжение составляет 8000/10000 В. В качестве растворителей для данных лаков используются крезол, сольвент, ксилол. Их вязкость по ВЗ-246 при 20 °С: 120...106 с (для ПИ-180ФА) и 35...45 с (для ПИ-180ФБ). Провод ПЭТ-180 относится к фреоностойким проводам. Интенсификация процесса изготовления

эмалированных проводов при использовании высокоскоростных эмаль-агрегатов потребовала разработки новых эмаль-лаков, обладающих специфическими свойствами: хорошей растекаемостью, незначительным содержанием низкомолекулярных фрагментов пленкообразующей смолы, которые выгорают при повышенных температурах эмалирования и т. д. ЗАО «Электроизолит» разработаны для высокоскоростного эмалирования лаки Элизван 155 (155Т) и ПИ-180 ФМ для эмалирования проводов на эмаль-агрегатах с *ИД* > 50.

Обычным способом получения полиимидов алициклического строения является поликонденсация, когда в результате взаимодействия диангидридов и диаминов вначале образуется полиамидокислота, из которой формуется пленка, которая затем термическим путем превращается в полиимид, причем температурный режим термообработки форполимеров довольно жесткий – от 80...100 до 300...350 °С.

Известно, что среди полимерных пленочных материалов полиимидная пленка занимает особое место благодаря высоким термическим, физико-механическим свойствам, диэлектрическим характеристикам, химической стойкости.

2.5. Лаки для проводов с температурным индексом 200...240 °С

Для проводов, длительно эксплуатируемых при температуре 200...220 °С, используются лаки на полиамидимидной основе. Полиамидимиды представляют собой полимеры, которые кроме амидных групп содержат имидные ароматические циклы.

Отечественный полиамидимидный лак АД-9113 представляет собой раствор полиамидимида в смеси N-метил-2-пирролидона с сольвентом каменноугольным в соотношении 9 : 1; в лаках ПАИ-200А, ПАИ-200Б используется композиция растворителей N-метилпирролидон, ксилол.

Кроме высокой нагревостойкости полиамидимидные лаки обеспечивают получение покрытий с механической прочностью, превышающей даже прочность покрытий на основе поливинилацеталевой смолы.

Полиимидных лаки применяются для изоляции проводов, длительно эксплуатируемых при 220...240 °С.

В процессе хранения при комнатной температуре вязкость полиимидных лаков снижается. При повышенных температурах, наоборот, возможна желатинизация из-за циклизации и сильного увеличения вязкости.

Производство полиимидных лаков связано с использованием дорогих и дефицитных материалов. Производительность труда при эмалировании полиимидными лаками снижается, что также приводит к удорожанию провода. Поэтому применение проводов с полиимидной изоляцией ограничено. Кроме того, следует учитывать, что эмалевая пленка на основе полиимидов обладает меньшей механической прочностью на истирание, чем, в частности, пленка на основе полиэфиров.

2.6. Основные виды и свойства растворителей для эмаль-лаков

Растворители – это органические летучие жидкости, применяемые для получения растворов пленкообразующих веществ. Растворители обеспечивают хорошую растекаемость лака на поверхности проволоки, но в состав эмалевой пленки не входят, полностью испаряясь при тепловой обработке провода в печах эмаль-агрегатов. Для снижения вязкости образующихся растворов используются специальные жидкости, которые сами по себе растворяющими свойствами не обладают. Это так называемые разбавители.

Большинство растворителей, применяемых в производстве обмоточных проводов, являются легколетучими горючими веществами. В смеси с воздухом они образуют пожароопасные и взрывоопасные смеси, причем степень опасности непосредственно зависит от объемной концентрации паров и в косвенной степени от температуры кипения и самовоспламенения жидкости, а также от температуры вспышки паров. Свойства основных растворителей и разбавителей приведены в табл. 2.1.

Основным растворителем лаков на полиэтилентерефталатной основе является технический крезол (трикрезол) с добавкой сольвент-натры в соотношении 1 : 4. Крезол представляет собой ароматическое соединение, у которого один углеродный атом бензольного кольца соединен с гидроксильной группой, другой – с группой CH_3. Общая формула крезола $C_6H_4CH_3OH$. В зависимости от пространственного расположения групп OH и CH существуют три изомерные формы крезола: орто-крезол, мета-крезол, пара-крезол. Изомерные соединения – это такие соединения, которые имеют одинаковый химический состав, но различную структуру и, как следствие, различные свойства. Орто-крезол имеет температуру плавления $T_{пл}$ = 30,9 °C и температуру кипения $T_{кип}$ = 191,0 °C, для мета-крезола $T_{пл}$ = 11,5 °C и $T_{кип}$ = 202,2 °C, для пара-крезола $T_{пл}$ = 34,8 °C и $T_{кип}$ = 201,9 °C.

Таблица 2.1

Свойства основных растворителей и разбавителей для эмаль-лаков

Наименование растворителя	Плотность, кг/м^3	Температура кипения, °С	Температура вспышки не ниже, °С	Предельно допустимая концентрация, мг/м^3	Токсичность	Основные типы отечественных лаков, в которых применяется данный растворитель
Трикрезол	1030...1050	190...210	75	0,5	Резко выраженное раздражающее и обжигающее действие	Полиэфирный и полиэфиримидный лаки: ПЭ-939, ПЭ-943, ПЭ-955, ПЭ-999, ИД-9142, полиуретановый лак УР-9119, УР-115К, полиамидный лак КЛ-1
Дикрезол	1033...1036	195...203	–	0,5	То же	Поливинилформалевый лак: ВЛ-941, ПЭ-955, ПЭ-999, ИД-9142
Сольвент каменноугольный	860	125...160	20...25	100,0	Ядовит. Наркотическое и раздражающее действие	Полиэфирный и полиэфиримидный лаки: ПЭ-955, ПЭ-943, ПЭ-955, ПЭ-999, ИД-9142 и др.
Ксиленол	–	210...230	75	2,0	Резко выраженное раздражающее и обжигающее действие	Полиэфирный лак ПЭ-939, ИД-9142
Ксилол	860...870	136...143	24	50,0	Ядовит. Наркотическое и раздражающее действие	Полиуретановый лак: УР-973, УР-91119, поливинилформальэтилалевый лак ВЛ-931, полиэфиримидный лак: ПЭ-999, ИД-9142, ПИ-180ФА, ПИ-180ФБ.
Хлорбензол	1107...1114	130...132	29	50,0	Ядовит, вызывает острые отравления и хронические интоксикации	Поливинилформальэтилалевый лак ВЛ-931

Окончание табл. 2.1

Наименование растворителя	Плотность, кг/м³	Температура кипения, °С	Температура вспышки не ниже, °С	Предельно допустимая концентрация, мг/м³	Токсичность	Основные типы отечественных лаков, в которых применяется данный растворитель
Этилцеллозольв	930...938	130...137	49	10,0	Слабое наркотическое действие	Поливинилформальэтилалевый лак ВЛ-931, полиамидный лак КЛ-1, поливинилбутиралевый лак: ВЛ-278, ВЛ-9148
Циклогексанон	942	155	40	10,0	Токсичен, действует на нервную систему	Полиамидно-бутиральный лак ПБ-1, полиуретановый лак УР-973
Диметилформамид	946...950	152...154	59	10,0	Ядовит. Раздражающее и общетоксическое действие	Полиимидный лак АД-9103
N-метил-2-пирролидон	1030...1034	202	94	100	Ядовит. Раздражающее действие на кожу, слизистые оболочки глаз и верхних дыхательных путей	Полиимидный лак: АД-9113, ПИ-9155, полиамидимидный лак ПАИ-200А, ПАИ-200Б
Этилкарбитол	968...990	198...203	85	–	Слабое наркотическое действие	Полиуретановый лак УР-9171, полиэфирный лак ПЭ-981, полиэфиримидный лак ИД-9149
Фенилгликоль	1109	246...298	130	–	То же	Полиэфирный, модифицированный лак ПЭ-981 М
Этиловый спирт	778	78...78,2	10...15	1000	–	Поливинилацетатный лак ВА-558
Керосин	840	180...315	40	300	–	Масляный лак типа МЛ

Технический крезол (трикрезол) представляет собой смесь всех трех изомеров. Методом отгонки из него получают метапара-крезол (дикрезол), который и применяется в качестве растворителя в лаке метальвин и других лаках. Он представляет собой прозрачную маслянистую жидкость. Дикрезол токсичен и может приводить к раздражению кожи, а при непосредственном контакте – к ожогам.

Сольвент каменноугольный и нефтяной, применяющийся в качестве добавок (разбавителя) к таким растворителям, как трикрезол и дикрезол, представляет собой смесь ароматических углеводородов (в основном толуола и ксилолов). Сольвент токсичен, хотя и в меньшей степени по сравнению с другими ароматическими углеводородами. Если трикрезол слаборастворим в воде, то сольвент в воде вообще не растворяется.

В качестве растворителей полиэтилентерефталатных и модифицированных полиэфирных лаков используется также смесь ксиленола, крезола и сольвента. Ксиленол получают из каменноугольной смолы, а также в результате термической переработки сланцев, торфа, древесины. Ксиленол является гомологом фенола с двумя метильными группами и имеет шесть изомеров. Его общая формула $C_6H_3(CH_3)_2OH$. Ксиленолы представляют собой прозрачную жидкость либо кристаллическую массу.

Ксилол каменноугольный и нефтяной представляет собой смесь трех изомеров и этилбензола. Он получается в процессе переработки каменноугольного сырого бензола или в процессе переработки ароматических нефтяных фракций. Общая формула ксилола C_8H_{10}, он нерастворим в воде.

В качестве растворителя поливинилформальэтилалевого лака винифлекс применяется смесь этилцеллозольва и технического хлорбензола в соотношении 1 : 1. Хлорбензол, имеющий химическую формулу C_6H_5Cl, представляет собой бесцветную жидкость со слабым миндальным запахом, является активным растворителем, продуктом хлорирования бензола.

Этилцеллозольв представляет собой моноэтиловый эфир этиленгликоля. Это прозрачная бесцветная жидкость. Его общая формула $C_2H_5OCH_2CH_2OH$, растворимость в воде полная. Этилцеллозольв получается в результате взаимодействия окиси этилена и этилового спирта.

В целях снижения токсичности летучей части лака ВЛ-931 и обеспечения возможности его переработки на эмаль-агрегатах с каталитическим дожиганием отходящих при эмалировании газов вместо хлорбензола могут быть использованы ксилол и сольвент.

В отечественной практике в качестве одного из компонентов растворителя полиуретанового лака используется циклогексанон, его общая формула $CH_2(CH_2)_4CO$. Циклогексанон представляет собой бесцветную жидкость с ацетоновым запахом.

Одним из перспективных для производства эмаль-лаков растворителей является диметилформамид $NCON(CH_3)_2$ – бесцветная прозрачная жидкость, используемая в качестве растворителя полиимидного лака.

В качестве основной добавки в смесевых растворителях для растворения эпоксидных, виниловых и акрилатных полимеров, хлоркаучука применяется толуо, который растворяет кремнийорганические смолы и полистирол. Его получают из нефтяных фракций и каменноугольной смолы. Общая формула толуола $C_6H_5CH_3$.Температура плавления толуола $T_{пл}$ = –95 °С, температура кипения толуола $T_{кип}$ = 110,6 °С.

Глава 3
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

3.1. Кабельная и телефонная бумага

В качестве изоляции обмоточных проводов, употребляемых для обмоток маслозаполненных трансформаторов, применяется кабельная и телефонная бумага. Бумага – это волокнистый материал, состоящий в основном из целлюлозы или клетчатки. В упрощенном виде химическую формулу целлюлозы можно представить в виде $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$. Для производства кабельной и телефонной бумаги используется сульфатная древесная целлюлоза, получаемая путем варки древесины в виде щепы со смесью едкого натра и сульфида натрия. После варки целлюлозу промывают, сушат и подвергают помолу в специальных машинах (роллах). После ролла бумажная масса поступает на латунную сетку бумагоделательной машины, к которой она прижимается валками, а затем на суконную ленту. После последовательного прохождения холодных и горячих валков образующаяся бумажная лента сматывается в рулон.

Известны и применяются и другие способы варки древесины, например в растворе, содержащем сернистую кислоту. Однако получаемая из такой целлюлозы бумага обладает меньшей механической прочностью и меньшей стойкостью к тепловому старению и поэтому не используется для электроизоляционных целей. Бумага как целлюлозный волокнистый материал имеет большую внутреннюю поверхность (суммарную поверхность волокон), так что она хорошо пропитывается изоляционными маслами, в частности трансформаторным. В пропитанном состоянии бумага приобретает высокие электроизоляционные свойства, необходимые для применения ее в качестве изоляции обмоточных проводов.

Применяемая для изоляции обмоточных проводов кабельная бумага имеет толщину 0,08 и 0,12 мм (марки К-080, К-120, КМП-120 по ГОСТ 23436–83). Кроме того, для изоляции обмоточных проводов, применяемых в мощных трансформаторах, используется кабельная высоко-

вольтная многослойная стабилизированная уплотненная бумага марки КВМСУ толщиной 0,08 мм по ГОСТ 645–89. Плотность кабельной бумаги марки К – 760 кг/м^3, марки КВМСУ – 1090...1100 кг/м^3. Чем выше плотность кабельной бумаги, тем выше ее электрическая прочность.

Одним из важнейших параметров кабельной бумаги является ее разрывная прочность как в продольном, так и в поперечном направлении. Разрывная прочность кабельной бумаги в продольном направлении заметно выше, чем в поперечном, так как в направлении вдоль рулона, т. е. вдоль сетки бумагоделательной машины, ориентация волокон значительно больше, чем в поперечном. Что же касается относительного удлинения, то оно, наоборот, выше в поперечном направлении бумаги. Так, для бумаги К-080 разрывное усилие в продольном направлении должно быть не менее 85 Н, в поперечном – не менее 40 Н; относительное удлинение должно быть соответственно не менее 2,2 и 6,5 %. Высокие значения разрывной прочности и относительного удлинения кабельной бумаги необходимы для исключения обрывности при ее наложении на проводник на изолировочных машинах, а также для обеспечения целостности бумажной изоляции проводов в процессе изготовления обмоток трансформаторов.

Электрические и механические параметры кабельной бумаги в значительной степени зависят от ее влажности. Высокая пористость бумаги при повышении влажности приводит к снижению электрических параметров и разрывной прочности. Для изоляции некоторых типов обмоточных проводов используется также телефонная бумага толщиной 0,05 мм (марка КТ-50 по ГОСТ 3553–87). Плотность телефонной бумаги – 820 кг/м^3, разрывное усилие в продольном направлении – не менее 62 Н, в поперечном – не менее 20 Н; относительное удлинение, соответственно, должно быть не менее 2,0 и 4,0 %. В ближайшем будущем в производстве обмоточных проводов возможно применение новых бумаг марок ТН-085 и ТНУ-120 с предполагаемым температурным индексом 120 (ТУ 13-7308001-773-88).

В электроизоляционных бумагах, применяемых для изоляции обмоточных проводов, не допускаются складки, морщины пятна, отверстия, различные посторонние включения. Число обрывов или взрывов в рулоне не должно быть больше трех. Перед испытаниями бумага должна кондиционироваться в течение не менее 6 часов. Кондиционирование образцов перед испытаниями и сами испытания проводят при (20 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (65 ± 2) %. Кабельная и телефонная бумага должна храниться в закрытых складах, защищенных от воздействия атмосферных осадков и почвенной влаги.

3.2. Природные волокнистые материалы

Хлопчатобумажная пряжа, как и бумага, состоит из целлюлозы, однако имеет длинноволокнистую структуру и характеризуется переплетением нитей, в то время как в бумаге отдельные короткие волокна расположены беспорядочно. Содержание целлюлозы в хлопчатобумажной пряже составляет 95...97 %. Хлопчатобумажная пряжа получается в результате прядения хлопковых волокон, которые предварительно подвергаются чесанию кардолентами.

Переплетение нитей в хлопчатобумажной пряже обеспечивает ее более высокую механическую прочность, особенно на перегиб и истирание. Так как волокна хлопчатобумажной пряжи имеют неправильную цилиндрическую форму, то характеризовать пряжу и волокнистые материалы геометрическими размерами не представляется возможным.

Поэтому в текстильном производстве для оценки толщины волокон и нитей используют значение линейной плотности. Линейная плотность T_H выражается в тексах, означает массу нити длиной в 1 см и определяется по формуле

$$Г_н = 1000m/L, \tag{3.1}$$

где m – масса нити, г; L – длина нити, м.

В системе СИ линейная плотность (толщина) выражается в кг/м (1 кг/м = 1 Мтекс).

Для изоляции обмоточных проводов используется хлопчатобумажная суровая однониточная пряжа (нить), которая образуется в результате скручивания параллельно расположенных волокон. Число кручений пряжи на длине 1 м называют круткой. При повышении крутки механическая прочность нити возрастает, нить становится более упругой и менее настильной, т. е. в меньшей степени расплющивается при наложении на проводник. Для применения в качестве тонкослойной изоляции обмоточных проводов нить должна обладать повышенной настильностью, а следовательно, иметь пониженную крутку. Кроме того, с уменьшением диаметра элементарных волокон их поверхность соприкосновения возрастает, поэтому возрастает сила трения между волокнами, что приводит к увеличению прочности пряжи на разрыв. Таким образом, для уменьшения толщины изоляции обмоточных проводов желательно применять нить с пониженной круткой, но с достаточной механической прочностью на разрыв, обеспечиваемой путем уменьшения диаметра элементарных волокон и увеличения их длины.

Для изоляции обмоточных проводов применяется основная гребенная хлопчатобумажная пряжа высшего и первого сортов с номинальной толщиной и номером 5,9 (170); 7,5 (133) и 10 (100) (ГОСТ 9092–81 и ОСТ 17-96-86). Название «основная пряжа» характеризует ее в качестве основы в текстильных материалах; название пряжи «гребенная» связано с видом применяемых для производства прядильных машин и рода прочеса. По внешнему виду, определяемому по фотоэталонам, пряжа подразделяется на классы А, Б и В, причем для кабельной промышленности поставляется пряжа первых двух классов. В зависимости от физико-механических показателей пряжу делят на четыре сорта: высший, первый, второй, третий. Для производства обмоточных проводов используется только пряжа высшего и первого сортов. Основная пряжа 5,9; 7,5 и 10 текс высшего и первого сортов изготовляется только из хлопка – волокна тонковолокнистых сортов хлопчатника. Основными параметрами хлопчатобумажной нити, регламентируемыми в стандартах, являются относительная разрывная нагрузка, коэффициент вариации по разрывной нагрузке и показатель качества, определяемый как частное от деления относительной разрывной нагрузки на коэффициент вариации по разрывной нагрузке.

Нормированная кондиционная влажность пряжи составляет 7 %. Если фактическая влажность отличается от кондиционной, то масса пряжи должна быть пересчитана путем приведения к кондиционной.

Натуральный шелк применяется для изоляции обмоточных проводов прежде всего потому, что он обеспечивает получение меньшей толщины изоляции по сравнению с хлопчатобумажной пряжей или каким-либо синтетическим волокном. Достаточно сказать, что диаметральная толщина шелковой изоляции, наложенной на проволоку методом обмотки, находится в пределах 0,05...0,08 мм, т. е. почти соответствует толщине эмалевой изоляции.

Натуральный шелк – это естественное волокно, получаемое размоткой коконов гусеницы шелкопряда, питающейся листьями тутового дерева-шелковицы. Разматываемая нить состоит из собственно шелкового волокна, представляющего два склеенных между собой волоконца, и оболочки из серицина – шелкового клея. Натуральный шелк, предназначенный для электрической изоляции, прежде всего освобождают от серицина, отваривая шелк-сырец в водном растворе соды и мыла. При этой отварке удаляются также минеральные соли, снижающие электроизоляционные параметры шелка. После удаления серицина основная шелковая нить состоит из фиброино-белкового вещества. Молекула фиброина построена из остатков различных аминокислот,

главными из которых являются глицин (или аминоуксусная кислота) CH_2-CH_2-COOH и аланин (или α-аминопропионовая кислота) CH_3-$CHNH_2$-COOH. В сложной молекуле фиброина многократно повторяется группа CONH, получившая название пептидной связи.

В кабельной промышленности применяется одно-, двух-, трех- и четырехниточный натуральный шелк в крашеном виде (ГОСТ 1086–74).

При обозначении линейной плотности двух-, трех- и четырехниточного шелка в тексах сначала указывают плотность одной нити и через знак умножения указывают число нитей, например: 1,98 × 2 или 1,89 × 3. Общую линейную плотность получают перемножением этих чисел. Для производства обмоточных проводов используется натуральный шелк с метрическими номерами 391 и 529 (линейная плотность в тексах составляет 2,56; 3,78; 5,67; 7,68 и 10,24).

В стандарте на натуральный шелк регламентируются пределы отклонения номинальной линейной плотности, коэффициент вариации по линейной плотности, относительная разрывная нагрузка одиночной нити, удлинение при разрыве, крутка (число кручений на 1 м). По химическим показателям изоляционные нити из натурального шелка должны соответствовать следующим требованиям: количество жира и мыла должно быть не более 1,7 %, значение pH (водородный показатель) водной вытяжки – в пределах 4...7. Удельная электрическая проводимость водной вытяжки не должна превышать $80 \cdot 10^{-6}$ $(Ом \cdot см)^{-1}$.

Нормированная кондиционная влажность изоляционных нитей устанавливается равной 9,5 %.

Если фактическая влажность нитей отличается от кондиционной, производится соответствующий пересчет массы нитей. В изоляционных нитях не допускаются следующие дефекты: смешение нитей различных линейных плотностей; петли или слабая, неровная, запутанная намотка; намотка на катушке двух отрезков нити; намотка разорванных или посторонних нитей на катушку; заметно выраженная ворсистость нити; непрокрашенные участки. Для изоляции обмоточных доводов, как правило, применяется шелк темно-синего цвета, так как при обмотке белым натуральным шелком эмалевая изоляция просвечивает сквозь обмотку, создает неровный серый цвет провода и затрудняет определение дефектов изоляции.

Хранение изоляционных нитей из натурального шелка должно производиться в помещениях, закрытых от воздействия солнечных лучей, при температуре от 5 до 30 °С и относительной влажности воздуха до 70 %. Срок хранения не должен превышать 1 года с момента изготовления.

3.3. Стеклянные волокна

Для изоляции обмоточных проводов применяются стеклянные крученые комплексные нити, выработанные из непрерывных элементарных нитей из алюмоборосиликатного стекла с содержанием оксидов щелочных металлов не более 0,5 %. Термин «крученая комплексная нить» обозначает крученую нить из двух или более комплексных (первичных) нитей, состоящих из непрерывных элементарных волокон. В соответствии с составом такое стеклянное волокно в практике называют бесщелочным алюмоборосиликатным.

Стекловолокно получают из расплава стекла, имеющего температуру примерно 1450 °С. Для этого стеклянные шарики диаметром (20 ± 1) мм помещают в специальную ванночку (лодочку) из платинородиевого сплава, имеющую электрический обогрев. В целях обеспечения необходимого качества получаемого стекловолокна уровень расплава в лодочке должен быть постоянным, что осуществляется автоматизированной подачей в нее шариков. Расплавленное стекло под действием силы тяжести вытекает через отверстия диаметром от 0,85 до 1,5 мм, расположенные в фильерной пластине, нагретой до 1250 °С. Число таких отверстий 100...800. Вытекающие стеклянные нити, еще не успевшие полностью затвердеть, поступают на быстро вращающийся барабан и вытягиваются в тонкие волокна диаметром 3...6 мкм. Отдельные волокна, число которых равно числу отверстий в фильере, соединяются в одну прядь с помощью замасливателя специального состава. Замасливатель обеспечивает также при последующей текстильной переработке разматывание волокон, исключает спутывание волокон из различных прядей. Само по себе присутствие замасливателя приводит к ухудшению пропитки стекловолокнистой изоляции, снижает ее электрическое сопротивление. Поэтому с этой точки зрения стремятся уменьшить количество вносимого в нить замасливателя.

Для получения крученой комплексной нити прядку стекловолокна подвергают крутке. Обычно комплексная нить содержит 100 элементарных волокон, скрученных с числом кручений 100 ± 10 на 1 м. Две однокруточные комплексные нити скручиваются между собой с тем же числом круток, но в направлении, обратном кручению однокруточных нитей. В результате образуется крученая комплексная нить, обладающая высокой разрывной прочностью и достаточной настильностью, т. е. способностью расплющиваться на проволоке, образуя слой минимальной толщины. Такая нить также технологична: не обры-

вается при ослаблении натяжения в процессе обмотки, не образует петель и т. п.

Стеклянные нити поставляют на сухих бумажных патронах или конусах с массой нити от 80 до 250 г. Для транспортировки нити упаковываются в водонепроницаемую бумагу и затем помещаются в ящик. Гарантийный срок хранения стеклянных нитей – 1 год со дня изготовления.

Стеклянные нити обладают высокой механической прочностью на разрыв: так, при диаметре элементарного волокна 5 мкм его разрывная прочность составляет около 2000 МПа. С увеличением диаметра волокна разрывная прочность и гибкость снижаются. Само по себе стекловолокно имеет малую гигроскопичность, однако при попадании влаги резко снижаются электрические параметры стеклянной нити.

Типичными недостатками стекловолокна являются низкая эластичность (удлинение при разрыве не превышает 2...3 %), невысокая механическая прочность на истирание, выделение пыли при технологической переработке, ухудшающее условия труда работающих.

При изолировании обмоточных проводов стекловолокно подклеивают к проволоке, пропитывают и лакируют специальными органическими лаками или составами без растворителей.

В настоящее время в процессе производства обмоточных проводов находят применение комплексные стеклополиэфирные нити марок БС6П-11,8 и БС5П-10,6. Эти нити получают путем скрутки стеклянных и полиэфирных нитей в примерном соотношении по массе 1 : 1. При изготовлении проводов в процессе термообработки полиэфирная составляющая этих нитей оплавляется, благодаря чему происходит подклейка к проволоке и склейка стеклянных нитей между собой. Применение стеклополиэфирных нитей позволяет в 3–4 раза уменьшить расход лаков с соответствующим уменьшением выбросов в атмосферу паров растворителей (ксилол, этилцеллозольв, ацетон и др.), в 3–4 раза уменьшить запыленность рабочей среды и не менее чем в 1,5–2 раза повысить один из основных параметров обмоточных проводов – механическую прочность изоляции на истирание.

Конструкции некоторых стеклянных нитей по ГОСТ 8325–78 и стеклополиэфирных нитей по ТУ 6-19-386-88, применяемых для изоляции обмоточных проводов, приведены в табл. 3.1.

Обозначение марок стеклянных нитей состоит из трех частей. В первой части буква Б обозначает алюмоборосиликатный состав стекла, буква С – непрерывную элементарную нить, цифра – номиналь-

ный диаметр элементарной нити. Во второй части первое число обозначает линейную плотность комплексной (первичной) нити в тексах, второе и третье – число сложений при первом и втором скручиваниях. Третья часть обозначает вид замасливателя; если эта часть не указывается, то используется стандартный замасливатель, представляющий собой парафиновую эмульсию.

Обозначение марок стеклополиэфирных нитей состоит из двух частей, разделенных тире. Первая часть: вид стекла (буква Б – алюмосиликатное стекло), буква С обозначает элементарную нить, цифра – номинальный диаметр элементарной стеклянной нити в мкм, буква П – полиэфирная нить. Вторая часть обозначает линейную плотность крученой стеклополиэфирной нити.

Таблица 3.1

Конструкции и параметры некоторых стеклянных и стеклополиэфирных нитей, применяемых для производства обмоточных проводов

Марка нити	Структура нити	Допустимое отклонение по результирующей номинальной толщине, %	Разрывная нагрузка, Н (кгс), не менее	Номинальное число кручений на 1 м нити	Настильность
БС3 – 1,8 × 2	1,8 текс × 1 × 2 = = 3,6 текс	+5...–7	2,18 (0,22)	100	0,11
БС4 – 3,4 × 1 × 2	3,4 текс × 1 × 2 = = 6,8 текс	+5...–7	4,14 (0,42)	100	0,16
БС6 – 6,8 × 1 × 2	6,8 текс × 1 × 2 = = 13,6 текс	+5...–7	7,9 (0,8)	100	0,18
БС6 – 13 × 1	13 текс × 1 = = 13 текс	+5...–7	7,9 (0,8)	50	0,2
БС5 – 11 × 1	11 текс × 1 = = 11 текс	+5	6,68 (0,68)	50	0,158
БС5П – 10,6	БС5 – 5,6 + 5,0 полиэфирная нить = 10,6 текс	+0,53...–1,06	3,4 (0,35)	90	0,164
БС6П – 11,8	БС6 – 6,8 + 5,0 полиэфирная нить = 11,8 текс	+0,59...–1,18	4 (0,41)	90...100	0,164

Результирующая номинальная толщина R_H в тексах получена расчетным путем. Настильность нити определяется путем намотки 50...100 витков на металлический конус и последующего деления длины обмотанной части конуса на число витков. Натяжение нитей при намотке должно обеспечить получение плотной обмотки, не имеющей просветов.

Для изоляции обмоточных проводов особо высокой нагревостойкости используется кварцевое волокно, содержащее до 98 % кремнезема SiO_2. Если обычное бесщелочное алюмоборосиликатное стекловолокно размягчается при температурах около 650 °С, то для кварцевого волокна эта температура находится в области 1600 °С. Обладая очень высокой нагревостойкостью, кварцевое волокно имеет невысокую механическую прочность на разрыв как в исходном состоянии, так и после длительного пребывания при 400...700 °С. Последнее обстоятельство объясняется самой технологией изготовления кварцевого волокна, которое получают не фильерным методом, а вытягиванием из специальной цилиндрической заготовки (штабика). Снижение прочности связано с дефектами расплава и формования, большим натяжением нитей при выработке из штабиков, приводящим к абразивному взаимодействию волокон между собой при намотке их на приемный барабан. Кроме того, штабиковый метод получения кварцевого волокна связан с повторным нагревом прозрачного кварцевого стекла, вызывающим его кристаллизацию и появление дополнительных внутренних напряжений, что в дальнейшем приводит к появлению микротрещин на поверхности кварцевых волокон. Поэтому на проволоку, как правило, накладывается комбинированная изоляция из кварцевых нитей и упрочненных стеклянных нитей, содержащих до 70 % кремнезема SiO_2. Конструкции кварцевых нитей марки КС7-4,5×1×2 приведены в ТУ 6-11-402-76. Конструкции упрочненных стеклянных нитей марки УПС6-6,9×1×2-76 соответствуют ТУ 6-11-588-64.

3.4. Синтетические волокна и пленки

Для производства некоторых типов обмоточных проводов используются синтетические волокна капрон и лавсан, полиэтилентерефталатная, политетрафторэтиленовая и полиимидно-фторопластовая электроизоляционные пленки. Последнее время за рубежом получило распространение использование синтетических нагревостойких бумаг на основе ароматических полиамидов, а также ленточных слюдосодержащих материалов.

Материалы, из которых изготовляются гибкие волокна и пленки, как правило, представляют собой линейные полимеры с высокой молекулярной массой. Задача замены остродефицитных натурального шелка и хлопчатобумажной пряжи в изоляции обмоточных проводов первоначально решалась путем использования полиамидного волокна капрон, состоящего из длинных цепевидных молекул, имеющих следующий химический состав: $[NH(CH_2)_5CO]_n$. Затем наряду с капроновым волокном стало применяться и полиэтилентерефталатное волокно (лавсан), представляющее собой продукт поликонденсации диметилтерефталата и этиленгликоля.

Синтетические волокна капрон и лавсан получают формованием из расплава. Капроновая или лавсановая смола в виде крошки поступает на плавильную решетку прядильной головки и выдавливается через фильеры. При производстве капронового волокна крошка свободно поступает на плавильную решетку; при переработке полиэтилентерефталата, характеризующегося высокой вязкостью расплава, применяют прядильные головки с принудительной подачей крошки с помощью дозирующих насосов. Формование волокон из расплава производится со скоростью до 1000 м/мин. После выхода из фильеры образующаяся струйка полимера вытягивается, затвердевает и превращается в волокно, наматываемое на бобину, расположенную на приемном устройстве. Перед намоткой на бобину на волокно наносится замасливатель, который снимает с волокна электростатический заряд и за счет пластификации обеспечивает лучшую вытяжку волокна.

После прядения синтетические волокна капрон и лавсан подвергаются вытяжке, крутке, фиксации крутки и перемотке. Вытягивание волокон с утонением нити в 3–4 раза происходит на специальных вытяжных машинах. Вытяжка производится при нагреве волокна между нагревательным диском и специальным утюгом с выпуклой поверхностью, имеющими электрический или масляный обогрев. Температура утюга составляет 90...200 °С; она зависит от состава вытягиваемого волокна, номера нити и скорости вытяжки. Чем больше степень вытяжки, тем большую механическую прочность имеет волокно; относительное удлинение при этом снижается. Суммарная степень вытяжки при сохранении требуемых механических параметров может быть повышена при двухступенчатой вытяжке. Нить на вытяжной машине принимается на веретено, одновременно подвергаясь скрутке (30...80 кручений на 1 м). Дальнейшая крутка может производиться либо на заводе синтетического волокна, либо на текстильных фабриках. После крутки во-

локна производится его термофиксация, целью которой являются ликвидация склонности волокна к усадке и закрепление крутки, которую имеет нить. Термофиксация волокон капрон и лавсан производится путем нагрева горячим воздухом с температурой, превышающей предполагаемую эксплутационную температуру на 30...40 °С, но не более, чем 210 °С. После термофиксации синтетические волокна перематывают на двух- или трехконусные крестовые бобины или копсы (металлические патроны с параллельной намоткой).

Для изоляции обмоточных проводов используется волокно капрон с номинальной линейной плотностью 5 текс и 12 элементарными нитями в комплексной нити. Волокно лавсан, используемое в производстве обмоточных проводов, имеет линейную плотность 11 и 29,4 текс (крученое и некрученое) и состоит из 24 или 36 элементарных нитей.

Капроновая нить выпускается неокрашенной и может иметь как блестящую, так и матированную (с добавлением диоксида тана) поверхность. Лавсановая нить выпускается как в окрашенном, так и в неокрашенном виде. Обычные цвета нити лавсан: малиновый, розовый, зеленый и цвета морской волны.

Основные физико-механические показатели синтетических нитей капрон и лавсан приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Основные физико-механические параметры нитей капрон и лавсан

Параметры	Нормы для нитей	
	Капрон с линейной плотностью 5 текс	Лавсан с линейной плотностью 11 текс
Относительная разрывная нагрузка, Н/текс, не менее	0,45	0,36
Удлинение нити при разрыве, %	24...32	22
Отклонение фактической линейной плотности от номинальной, %	±4	±4
Число кручений на 1 м нити	30	100 ± 15
Содержание замасливателя	1...3,5	3

Нормированная влажность капроновой нити устанавливается равной 5 % (фактическая влажность не должна превышать 7 %), лавсановой – 1 % (фактическая влажность не должна превышать 1,5 %). В технической документации на синтетические нити регламентируется количество дефектов или пороков по внешнему виду. К таким дефектам относятся количество узлов на бобине, обрывы нитей, шишки и нале-

ты на поверхности бобины, начало намотки от нижнего торца бобины. Такие дефекты, как несвязанные концы нитей, узлов, не выведенные на верхний торец бобины, намотка на патроны с повреждениями рабочей поверхности, мешающими нормальному сходу нити, и т. п. не допускаются.

Волокно капрон обладает высокой механической прочностью на разрыв и истирание, стойко к действию щелочей и органических кислот, спиртов, бензина. Температурный индекс изоляции из волокна капрон в пропитанном состоянии составляет 105 °С, температура размягчения – 200...210 °С. Специфическим недостатком капроновых нитей является невысокая светостойкость, выражающаяся в заметном снижении механических параметров под действием света. Электроизоляционные параметры капрона достаточно высоки, но они значительно снижаются в условиях повышенной влажности. Однако с появлением новых профилированных капроновых нитей «трилобал» с линейной плотностью 4,8 текс, которые по своим электроизоляционным и механическим характеристикам близки к натуральному шелку, появилась возможность изготовления изоляции обмоточных проводов с комбинированной изоляцией из волокон натурального шелка и волокна «трилобал».

Волокно лавсан более нагревостойко по сравнению с волокном капрон: его температурный индекс 120°С, температура размягчения составляет 240 °С, плавления – 256 °С. Это волокно гораздо более светостойко, обладает меньшей гигроскопичностью, но имеет также несколько меньшую стойкость на истирание и ударные механические воздействия. Лавсановые нити по сравнению с капроновыми обладают повышенной стойкостью к действию горячего трансформаторного масла, различных растворителей, менее резко снижают электроизоляционные параметры в условиях повышенной влажности. Следует отметить, что волокна капрон и лавсан не смогли полностью заменить в производстве обмоточных проводов натуральный шелк, так как удвоенная толщина изоляции при обмотке этими волокнами составляет 0,1...0,12 мм, в то время как натуральный шелк обеспечивает меньшую диаметральную толщину изоляции, равную 0,05...0,08 мм.

Для изоляции обмоточных проводов целесообразно по возможности применять цветные нити, так как при наложении в один слой на проволоку белое волокно просвечивает и создает мнимые просветы в изоляции.

Капроновые и лавсановые нити должны храниться в крытых складских помещениях, обеспечивающих защиту нити от механиче-

ских повреждений, непосредственного воздействия солнечных лучей, атмосферных осадков, паров кислот, щелочей и других агрессивных сред при температуре 5...35 °С с относительной влажностью воздуха не более 80 %.

Более высокой нагревостойкостью обладают такие химические волокна, как фенилон, сульфон, оксалон и аримид, которые также могут использоваться для изоляции обмоточных проводов.

Основой волокна фенилон является ароматический полиамид, получаемый в результате поликонденсации ароматических диаминов и ароматических дикарбоновых кислот. Для производства волокна сульфон используется смола, представляющая собой продукт поликонденсации диаминодифенил-сульфона и терефталевой кислоты. Волокно оксалон получают формованием из раствора полиоксадиазола, аримид – из раствора смолы, получаемой при поликонденсации диангидрида пиромеллитовой кислоты и диаминодифенилового эфира. Однако стоимость всех этих волокон довольно высока и, возможно, что вместо них для изоляции обмоточных проводов в будущем более целесообразно применять нагревостойкие эмалевые покрытия. Для изоляции обмоточных проводов, применяемых для крупных электрических машин, в комбинации с хлопчатобумажной пряжей используется полиэтилентерефталатная пленка лавсан по ГОСТ 24234–80.

Лавсановая пленка изготовляется методом выдавливания расплава полимера через щелевидную матрицу, после чего образующуюся пленку в целях повышения механической прочности подвергают ориентации, т. е. растягивают в продольном и поперечном направлениях.

Лавсановые пленки имеют высокую температуру плавления (265 °С) и высокую прочность. Они могут длительно эксплуатироваться при 120 °С. Пленка имеет электрическую прочность около 45...100 МВ/м. Толщина пленки, применяемой для изоляции обмоточных проводов, составляет 0,025 мм.

Для погружных электродвигателей насосов добычи нефти с температурой обмотки 155...180 °С требуются обмоточные провода с более нагревостойкой фторопластовой изоляцией. Высокая надежность обеспечивается при применении в качестве изоляции фторполимерных пленок, которые после наложения на проволоку обмоткой спекаются с помощью нагрева токами высокой частоты.

В производстве обмоточных проводов используются пленки из политетрафторэтилена или фторопласта-4, имеющие следующее строение:

```
     F   F   F   F
     |   |   |   |
... -C - C - C - C - ...
     |   |   |   |
     F   F   F   F
```

Макромолекулы политетрафторэтилена имеют симметричную структуру, а полимер – высокую кристалличность (до 90 %). Это обусловливает высокую температуру разрушения кристаллов: при 327 °С кристаллиты переходят в аморфную фазу, полимер переходит в высокоэластичное состояние, спекаясь в монолитную прозрачную массу, и не плавится при нагреве вплоть до температуры разложения, равной 415 °С. Однако сильная полярность связей С-F и высокая симметричность строения обусловливают исключительно высокие диэлектрические свойства политетрафторэтилена, так как дипольный момент макромолекулы близок к нулю. Вследствие того, что политетрафторэтилен не плавится при нагреве и не растворяется ни в одном растворителе, пленку из него получают методом сострагивания. Для этого цилиндры из политетрафторэтилена с высотой, равной заданной ширине пленки, закрепляют в патроне токарного станка и с помощью резца снимают ленту в виде стружки. Это так называемая неориентированная пленка.

Пленка из политетрафторэтилена может длительно эксплуатироваться при температурах до 250 °С. Она обладает исключительно высокой стойкостью к действию любых растворителей или химических реагентов. Кроме того, пленка фторопласта хладостойка: она обеспечивает работоспособность изоляции вплоть до –269 °С. Недостаток пленки – хладотекучесть, т. е. способность к необратимой деформации под действием нагрузки практически при любых температурах за счет рекристаллизации. Политетрафторэтиленовая пленка также некороностойка, поэтому рабочие напряжения обмоточных проводов с фторопластовой изоляцией ограничены.

Наиболее перспективной с точки зрения применения в качестве пленочной изоляции обмоточных проводов является полиимидно-фторопластовая пленка, представляющая собой комбинированный пленочный материал. Основу комбинированной пленки составляет полиимидная пленка, процесс производства которой заключается в выдавливании тонкого слоя полиимидного лака на гладкую металлическую поверхность с его последующим затвердеванием (образование полиамидокислоты и последующая термоциклизация с образованием полиимида). Толщина основы – 30 мкм или более. Полиимидная основа покрывается (дублируется) с одной или двух сторон слоем сополимера те-

трафторэтилена и гексафторпропилена толщиной 5...10 мкм. Длительная рабочая температура полиимидно-фторопластовой пленки составляет 200 °С. Пленка выпускается двух типов: с одно- и двухсторонним фторопластовым покрытием. При нагревании пленки после обмотки фторопластовые покрытия свариваются, обеспечивая плотность и герметичность изоляции. Повышенная стойкость полиимидной основы к продавливанию и истиранию обеспечивает меньшую повреждаемость полиимидно-фторопластовой изоляции обмоточных проводов по сравнению с фторопластовой при изготовлении методом протяжки провода в паз обмотки погружных электродвигателей насосов нефтедобычи.

Основные параметры полиэтилентерефталатной, политетрафторэтиленовой и полиимидно-фторопластовых пленок, применяемых в производстве обмоточных проводов, приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Основные параметры пленок,
применяемых для изоляции обмоточных проводов

Параметры	Вид пленки		
	Полиэтилентерефталатная	Политетрафторэтиленовая неориентированная	Полиимидно-фторопластовая
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	140...290	16	80...90
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	60...180	160	75
Электрическая прочность при частоте 50 Гц, МВ/м, не менее	45...100	60*	160
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц	2,9	1,8... 2,1	2,7
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц	$18 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см, не менее	$1 \cdot 10^{14}$	–	$1 \cdot 10^{16}$

** При постоянном напряжении.*

В производстве обмоточных проводов используются также слюдосодержащие ленточные материалы, имеющие высокие электрические параметры и достаточные физико-механические свойства. Обмоточные провода с такой изоляцией используются для крупных электрических машин на напряжение 6...10 кВ взамен проводов с волокнистой или эмалево-волокнистой изоляцией. По своему составу ленточные

слюдосодержащие материалы представляют собой различные комбинации полимерных пленок, стеклоткани или стеклосетки и слюдяной бумаги, пропитанные соответствующим связующим составом. За рубежом в качестве связующего используется модифицированная эпоксидная смола, в отечественной практике – полиакрилатная смола.

Толщина ленты, как правило, 0,09...0,10 мм, разрушающее напряжение – до 100 МПа, электрическая прочность при переменном напряжении – не менее 40...55 МВ/м.

Слюдосодержащая лента с применением в качестве связующего полиакрилатов обеспечивает возможность склеивания отдельных витков и получения монолитных обмоток электрических машин при температуре (130 ± 10) °С в процессе их опрессования за счет связующего, содержащегося в ленте.

3.5. Лаки и составы для подклейки, пропитки и поверхностного покрытия стекловолокнистой изоляции

Для подклейки, пропитки и поверхностного покрытия (лакировки) стекловолокнистой или стеклополиэфирной изоляции обмоточных проводов в мировой практике используются лаки на глифталевой, полиэтилентерефталатной, эпоксидной и кремнийорганической основе. В отечественной практике для проводов с температурным индексом 155 применяются лаки на глифталевой основе: ФА-97 (ТУ 6-10-1388-74) и ГФ-985, ГФ-986 (ТУ 16-504.012-71); для проводов с температурным индексом 200 – кремнийорганические лаки КО-916, КО-916А (ГОСТ 16508–70) и КО-916К (ТУ 6-02-690-78).

Среди глифталевых лаков наилучшие параметры проводов обеспечивает лак ФА-97, представляющий собой раствор касторового алкида и алкилфенольной смолы в ксилоле. По существу, это глифталево-масляный лак, модифицированный термореактивной смолой. Содержание нелетучих в лаке составляет 48...57 %. Лак ФА-97 обеспечивает получение однородной глянцевой поверхности проводов, он достаточно технологичен и стабилен по качеству. Электрические параметры лака высоки. Так, в нормальных условиях при испытаниях на пластинках его электрическая прочность составляет не менее 70 МВ/м, после пребывания в атмосфере с относительной влажностью воздуха (95 ± 3) % при (20 ± 5) °С в течение 24 ч – не менее 40 МВ/м. Гарантийный срок хранения лака – 6 мес. Токсичность лака ФА-97 определяется в основном содержанием в лаке ксилола.

Основу глифталевых лаков ГФ-985 и ГФ-986 составляет глифталевая кислота, модифицированная жирными кислотами льняного масла. В качестве растворителя лаков применяются этилцеллозольв, ацетон, уайт-спирит или смесь толуола и спирта (54:46). Недостатком этих лаков является неоднородность поверхности и неравномерность механической прочности пленки по длине провода, связанные с относительно невысокой технологичностью. Поэтому лаки ГФ-985 и ГФ-986 постепенно вытесняются лаком ФА-97.

Кремнийорганические полимерные соединения состоят из цепей, в которых атомы кремния чередуются с атомами кислорода:

```
        |       |       |
... - Si – O – Si – O – Si - ...
        |       |       |
```

В кремнийорганических полимерах по месту связей кремния присоединены органические радикалы: CH_3, C_2H_5, C_6H_5 и др. Наличие в такого рода соединениях прочной силоксановой связи Si-O обусловливает их исключительно высокую нагревостойкость. Кремнийорганический лак КО-916, применяемый для подклейки, пропитки и лакировки стекловолокнистой изоляции, представляет собой однородный прозрачный раствор полиметилфенилсилоксана, модифицированного полиэфирами, в этилцеллозольве. Растворителем лака может являться также ксилол; в этом случае к марке лака добавляется индекс «к»: КО-916к. Структурная формула полиметилфенилсилоксана приведена ниже:

```
   C6H5      C6H5
    |         |
...Si – O – Si – O - ...
    |         |
   CH3       CH3
```

Наличие двух органических радикалов на один атом кремния обеспечивает повышенную эластичность полимера, так как в этом случае число поперечных связей атомов кремния через атомы кислорода, обусловливающих жесткость структуры, уменьшается. В то же время механические параметры полимера снижаются.

Цвет лака – от бесцветного до желтого, содержание сухого остатка – (67 ± 2) %, условная вязкость – 45...65 с по вискозиметру ВЗ-4. Проверка стабильности химического состава лака производится путем определения содержания водорода, связанного с кремнием, которое не должно превышать 0,0018 %.

Электрические параметры пленки на основе лака КО-916 после отверждения, определяемые на пластинах, приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Удельное объемное электрическое сопротивление и электрическая прочность пленки лака КО-916 после отверждения

Условия проведения испытаний	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см, не менее	Электрическая прочность лаковой пленки, МВ/м, не менее
При 15...35 °С	$1 \cdot 10^{14}$	70
При (180 ± 2) °С	$1 \cdot 10^{12}$	35
После воздействия среды с относительной влажностью воздуха (95 ± 2) % при (23 ± 2) °С в течение 24 ч	$1 \cdot 10^{13}$	40

Гарантийный срок хранения лака КО-916 – 5 мес. Параметры лака КО-916 А, также применяемого в производстве обмоточных проводов, незначительно отличаются от параметров лака КО-916. Например, он имеет несколько меньшее содержание сухого остатка – (60 ± 2) % и несколько меньшую вязкость – 30...60 с по ВЗ-4. Кроме того, в отличие от лака КО-916, вводится показатель оптической плотности лака.

3.6. Пластмассы, применяемые в производстве обмоточных проводов

В тех случаях, когда обмоточные провода эксплуатируются в воде или в жидкостях, содержащих воду, их изоляция должна быть монолитной и водостойкой. Основным типом изоляционных материалов, удовлетворяющих этим требованиям, являются пластические массы, перерабатываемые методом экструзии: полиэтилен, полипропилен, некоторые фторполимеры, поливинилхлоридный пластикат.

Основным типом электроизоляционных материалов, обеспечивающих получение монолитной и герметичной изоляции обмоточных проводов водостойкого исполнения, являются пластические массы на основе полеолефинов – полиэтилен низкой (марок 153-01 (02)К, 102-01 (02)К по ГОСТ 16336–77) и высокой (марок 271-70 (-82; -83)К по ГОСТ 16336–77) плотности и блок сополимер пропилена с этиленом (марки 22015 по ГОСТ 26996–86), перерабатываемые методом экструзии.

Полиэтилен, полученный в результате переработки нефтяного сырья, представляет собой продукт полимеризации этилена:

$$(\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-})_n$$

и в зависимости от способа получения разделяется на полиэтилен низкой плотности (высокого давления) и высокой плотности (низкого давления).

Полиэтилен низкой плотности получают путем полимеризации этилена при давлениях 150...300 МПа и температуре около 200 °С с использованием кислорода в качестве инициатора реакции. Полиэтилен низкой плотности состоит из макромолекул со значительным количеством боковых ответвлений, т. е. имеет разветвленную структуру.

Полиэтилен высокой плотности, применяемый в качестве изоляции обмоточных проводов, получают путем полимеризации при давлении 0,3...0,4 МПа в газовой фазе с использованием комплексных катализаторов реакции и характеризуется слабо разветвленной структурой, высокой степенью кристалличности и чистотой. По сравнению с полиэтиленом низкой плотности полиэтилен высокой плотности имеет более высокие температуру плавления, механическую прочность и жесткость.

Блок-сополимер пропилена с этиленом получают путем сополимеризации пропилена и этилена при давлении 0,5...1,0 МПа в среде инертного растворителя в присутствии металлоорганических катализаторов, в результате чего конечный продукт имеет структурную формулу

$$\left(-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}- \right)_n -(CH_2-CH_2)_m$$

с молярным содержанием этиленовых звеньев 10...15 %. Блок-сополимер пропилена с этиленом имеет более высокую механическую прочность, химостойкость и температуру плавления по сравнению с полиэтиленом и отличается от полипропилена более высокой ударной вязкостью и морозостойкостью.

Для изоляции обмоточных проводов используются марки и рецептуры материалов, обладающие наилучшим комплексом свойств для эксплуатации в воде: стойкостью к растрескиванию, высокими механическими и электрическими свойствами, чистотой и минимальным количеством стабилизирующих добавок.

С точки зрения использования в качестве изоляции обмоточных проводов одним из важнейших параметров полиэтилена является стойкость к растрескиванию. Стойкость полиэтилена к растрескиванию связана с целым рядом факторов, в частности, хорошо известно, что она пропорциональна молекулярной массе. Молекулярная масса полиэтилена косвенно может определяться по показателю текучести расплава,

который выражается массой вещества, проходящего при 190 °С в течение 10 мин через стандартное сопло. Наилучшей стойкостью к растрескиванию обладает полиэтилен с индексом расплава 0,3...0,7 г/10 мин, который и применяется в производстве обмоточных проводов. Основные параметры полиэтилена и блок-сополимера полипропилена с этиленом приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Основные параметры пластмасс на основе полиолефинов, применяемых для производства обмоточных проводов

Параметры	Полиэтилен низкой плотности	Полиэтилен высокой плотности	Блок-сополимер пропилена с этиленом
Плотность, кг/м^3	919...924	950...955	0,900
Показатель текучести расплава, г/10 мкм	0,21...0,39	0,4...0,65	1...2
Стойкость к растрескиванию, ч, не менее	500	500	500
Разрушающее напряжение, МПа	14...15	25...26	24...30
Относительное удлинение при разрыве, %	600	700	300
Среднее значение температуры интенсивного плавления, °С	110	130	170
Теплостойкость по Вика, °С	45...50	80...85	105...110
Морозостойкость, °С	–70	–70	–(45...50)
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц	2,3...2,4	2,4	2,2...2,3
Электрическая прочность при толщине образца 1 мм, МВ/м, не менее	40	40	35
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	10^{17}	10^{17}	10^{17}

Для изоляции обмоточных проводов, предназначенных для эксплуатации в воде при напряжении до 380 В, в комбинации со слоем эмали используется поливинилхлоридный пластикат, который представляет собой пластифицированный сложными эфирами жирных кислот поливинилхлорид.

В качестве пластификаторов поливинилхлорида обычно используются диоктилсебацианат, диоктилфталат, диизодецилфталат и тому подобные соединения. В состав поливинилхлоридного пластиката в качестве стабилизатора вводится также основной углекислый свинец или стеарат кальция. При уменьшении количества пластификаторов твердость пластиката повышается, однако другие параметры (эластичность, морозостойкость) снижаются. Для применения в качестве изоляции обмоточных проводов поливинилхлоридный пластикат должен обладать повышенной твердостью и за счет этого обеспечивать возможность намотки электродвигателей в протяжку. В отечественной практике таким требованиям удовлетворяет пластикат рецептуры 489. Основные параметры кабельного изоляционного поливинилхлоридного пластиката приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Основные параметры поливинилхлоридного пластиката, применяемого для производства обмоточных проводов

Параметр	Значение параметра
Плотность, 10^3, кг/м^3	1,27...1,35
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	18...30
Относительное удлинение, %, не менее	200...250
Морозостойкость, °С	–40
Температура длительной эксплуатации, °С	+70
Температура разложения, °С	+200
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1000 Гц	0,05...0,07
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 1000 Гц	4,5...5,0
Электрическая прочность при толщине образца 1 мм, МВ/м	45...60
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·см, не менее	$10^{13}...10^{14}$

3.7. Электроизоляционные материалы для обмоточных проводов особо высокой нагревостойкости

При создании обмоточных проводов особо высокой нагревостойкости находит широкое применение комбинированная изоляция, состоящая из неорганических волокон и цементирующих органосиликатных композиций либо из тонкослойных стеклоэмалевых или керамических покрытий.

В качестве волокнистых материалов в этом случае используются непрерывные стеклянные и кварцевые волокна. Если провода эксплуатируются при температурах до 500 °С, то наиболее целесообразно применение бесщелочного алюмоборосиликатного стекловолокна на специальных замасливателях; при рабочих температурах свыше 500 °С необходимо использовать кварцевое и упрочненное стеклянное волокно, для обеспечения лучшей совместимости с органосиликатными цементирующими композициями, а также повышения нагревостойкости и электрических свойств изоляции стеклянные, упрочненные стеклянные и кварцевые волокна изготовляются с применением кремнийорганических замасливателей, одновременно оказывающих на волокна упрочняющее действие.

В качестве цементирующих волокнистую изоляцию составов применяются органосиликатные композиции, образующиеся в результате химического взаимодействия органических или элементоорганических соединений с силикатами. Композиции, применяемые для цементации волокнистой изоляции обмоточных проводов, представляют собой суспензии полимера с наполнителями в толуоле. В качестве неорганических компонентов органосиликатных материалов могут служить хризотиловый асбест, обработанный при 300...400 °С для удаления адсорбированной воды, а также слюда, тальк, окислы и карбиды некоторых элементов. Применяемые кремнийорганические полимеры имеют соотношение алкильных и арильных радикалов 1 : 1 и соотношение радикалов и кремния 1,8 : 1.

В системах полиорганосилоксансиликат-оксид в интервале 150...200 °С при наличии реакционноспособных атомов или групп у полимеров и силикатов происходит химическое взаимодействие, в результате которого образуется пространственная структура, в которой силоксановый каркас полимера связан с неорганическими компонентами не только силами физического взаимодействия, но и прочными химическими связями. Оксиды, с одной стороны, катализируют взаи-

модействие функциональных групп полимера и силикатов, а с другой – сами вступают в реакцию с полимером с образованием металлосилоксановых звеньев в цепях полимера. При 700 °С происхдит постепенное разрушение органического обрамления молекул полимера. Роль связующего постепенно переходит к кремнекислородному каркасу, лишенному органической части. В этом интервале температур химические процессы, по-видимому, осуществляются за счет реакционноспособных центров у атомов кремния, полученных при разрыве связи кремний-углерод. При высоких температурах целостность покрытия, его электроизоляционные и другие свойства не ухудшаются, а в ряде случаев даже улучшаются.

При температурах около 700 °С и выше структура системы становится сходной со структурами обычных керамических материалов. Ее состав должен определяться композицией полиорганосилоксансиликат-оксид.

Цементирующие композиции для волокнистой изоляции обмоточных проводов после отверждения приобретают достаточно высокие электрические параметры. Удельное объемное сопротивление их при комнатной температуре составляет $10^{12}...10^{15}$ Ом·см, при 400 °С – $10^{10}...10^{12}$ Ом·см, при 700 °С – $10^{7}...10^{6}$ Ом·см; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}002...0{,}05$; электрическая прочность 10...30 кВ/мм. Композиции устойчивы к действию вибрации, влаги, растворов кислот, щелочей, солей, обладают хорошей адгезией к стеклу, керамике, металлам. Плотность после отверждения 1300...2000 кг/м^3.

В качестве цементирующих составов для стеклянного и кварцевого волокна могут применяться также составы на фосфатной основе. Так, один из вариантов таких составов включает фосфат алюминия, фосфорную кислоту, неорганические мелкодисперсные наполнители (окиси, гидроокиси и силикаты металлов). В ряде случаев стекловолокнистая изоляция пропитывается составом, содержащим органическое связующее и порошок стекла.

Тонкослойная жаростойкая изоляция обмоточных проводов может быть получена в виде сочетания неорганического основного покрытия – стеклоэмалевого или керамического, наносимого непосредственно на поверхность проволоки, и органосиликатного поверхностного покрытия.

Многие керамические материалы, стекла и стеклоэмали обладают высокими электроизоляционными свойствами, значительно превосходя при этом обычные органические материалы по нагревостойкости. Однако использование их для изоляции обмоточных проводов затруд-

нено, так как эти материалы хрупки и не имеют достаточной эластичности, в то время как высокая гибкость покрытия является одним из основных требований, предъявляемых к обмоточным проводам. Отдельные неорганические покрытия приобретают некоторую эластичность в тонких слоях, что обусловливает принципиальную возможность их применения в производстве обмоточных проводов.

Разработка специальных составов керамических материалов, стекол и стеклоэмалей, соответствующая подготовка металла жилы и специальная технология нанесения покрытия дают возможность получить стеклоэмалевые или керамические покрытия, обладающие хорошей адгезией к металлу и приемлемой эластичностью.

Стеклоэмалевые покрытия формируются из композиций в расплавленном состоянии.

Стеклоэмалевое покрытие обмоточных проводов представляет в своей основе легкоплавкую систему PbO-B_2O_3-ZnO. Стеклоэмаль при удовлетворительных электроизоляционных характеристиках имеет повышенную эластичность и хорошо смачивает поверхность никеля. Хорошему смачиванию поверхности и уменьшению в связи с этим дефектов в покрытии способствуют оксиды бора цинка. Оксид свинца способствует повышению электроизоляционных свойств покрытия и его эластичности. В борсодержащих покрытиях создаются условия, благоприятные для всплывания на поверхность расплавленной эмали мелких газовых пузырьков, образующихся в слое земли при ее расплавлении на поверхности металла. Низкое поверхностное натяжение и малая вязкость расплавов, содержащих оксид бора, облегчают заплавление мест прорыва мелких газовых пузырьков в слое эмали и обеспечивают хорошее растекание покрытия, что важно для предупреждения образования дефектов. Температура размягчения стеклоэмали лежит в пределах 350...400 °С. Удельное объемное сопротивление стеклоэмали при комнатной температуре превышает 10^{14} Ом·м, при 400 °С равно 10^7 Ом·м.

Для более высоких температур эксплуатации обмоточных проводов (около 550...600 °С) оптимальный состав стеклоэмалевой изоляции имеет в своей основе систему PbO-B_2O_3-SiO_2.

В целях повышения адгезии слоя эмали к металлу жилы и снижения поверхностного натяжения в состав стеклоэмали были введены активаторы сцепления и поверхностно-активные вещества. К веществам, повышающим поверхностное натяжение, вязкость и другие свойства эмалей, в первую очередь можно отнести оксиды металлов второй группы CoO и NiO. Прочное сцепление является результатом окисли-

тельно-восстановительных реакций, протекающих в зоне контакта расплавленной эмали, содержащей оксиды, с поверхностью проволоки.

Тонкослойные керамические покрытия по сравнению со стеклоэмалевыми более нагревостойки и обладают лучшими электрическими параметрами, однако для их спекания требуются более высокие температуры. В состав жаростойких керамических покрытий входят огнеупорные оксиды или их соединения, а также уплотнители и модификаторы. В качестве огнеупорных материалов используются глинозем, кварц, слюда, тальк, оксиды циркония, титана, хрома, огнеупорная глина, бентонит и др. Модификаторы увеличивают гибкость и механическую прочность покрытия.

Керамические покрытия в сочетании с органосиликатным материалом могут использоваться для изоляции обмоточных проводов.

Удельное объемное сопротивление керамического покрытия отечественных обмоточных проводов при комнатной температуре превышает 10^{12} Ом·м, при 600 °С составляет примерно $2 \cdot 10^{5}$ Ом·м.

Стеклокерамические покрытия толщиной 10...15 мкм получают из полуколлоидных растворов, состоящих из тетраэтилового эфира ортокремниевой кислоты, нитратов Al, Si, Cr, Mg и борной кислоты. Длительная рабочая температура стеклокерамических покрытий на растворном стекле 850 °С. К недостаткам метода следует отнести неустойчивость технологического процесса, а также недостаточную адгезию покрытия к металлу.

Тонкослойные керамические и стеклоэмалевые покрытия обычно дополнительно лакируются кремнийорганическими или органосиликатными составами, что дает возможность повысить механическую прочность на истирание, электрическую прочность и эластичность изоляции.

Глава 4
КЛАССИФИКАЦИЯ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

Класс нагревостойкости – максимально допустимая температура, которая обеспечивает безотказную работу изоляции в течение длительного времени. Температурный индекс (ТИ) – температура, при которой ресурс или срок службы материала равен заданному.

По значению температурного индекса (класса нагревостойкости) можно классифицировать обмоточные провода следующим образом:

1) с ТИ = 105 °С (например, поливинилацеталевая изоляция и изоляция на основе масляных лаков, пропитанный натуральный шелк, бумага);
2) ТИ = 120 °С (полиуретановая изоляция; изоляция из волокна лавсан и т. д.);
3) ТИ = 130 °С (например, немодифицированная полиэфирная изоляция);
4) ТИ = 155 °С (полиэфиримидная изоляция, стекловолокнистая изоляция, пропитанная глифталевыми лаками, и т. д.);
5) ТИ = 180 °С (например, стекловолокнистая изоляция, пропитанная кремнийорганическими лаками, некоторые модифицированные полиэфиримидные лаки);
6) ТИ = 200 °С (полиамидимидная изоляция);
7) ТИ = 220...240 °С (полиимидная изоляция).

Для проводов более высокой нагревостойкости температурные индексы не устанавливаются, так как при 250...300 °С и выше срок эксплуатации обмоточных проводов менее 20 тыс. часов.

Класс нагревостойкости эмалевой изоляции проводов обуславливается химическим составом эмалевого лака.

По материалу токопроводящей жилы провода делятся на медные и алюминиевые.

Помимо этого обмоточные провода в зависимости от типа изоляции подразделяются на эмалированные, провода с волокнистой (эмальволокнистой, стекловолокнистой) и пленочной изоляцией.

4.1. Эмалированные провода

Эмалированные провода с температурным индексом 105 °С (класс нагревостойкости А) выпускаются с изоляцией на основе синтетических высокопрочных лаков.

Наибольшее количество эмалированных проводов с ТИ 105 выпускаются с поливинилацеталевой изоляцией, т. е. с изоляцией на основе лаков винифлекс или метальвин или зарубежных аналогов. Это круглые медные провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2, прямоугольные медные провода марки ПЭВП, круглые алюминиевые провода марки ПЭВА на поливинилформальэтилалевом лаке, а также прямоугольные медные провода марки ПЭПМ на поливинилформалевом лаке. Кроме того, с поливинилформалевой изоляцией выпускаются медные хладостойкие провода марки ПЭМФ, предназначенные для механизированной намотки статоров электродвигателей холодильных агрегатов.

За рубежом в ряде случаев эмаль-провода с поливинилацеталевой изоляцией рекомендуется относить к температурному индексу 120.

Провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2, различающиеся толщиной изоляции, пришли на смену проводам марки ПЭЛ и полностью вытеснили их из производства электрических машин, так как повышенная механическая прочность поливинилацеталевой изоляции на истирание позволила использовать их при намотке без дополнительной защиты слоем хлопчатобумажной пряжи.

Требования, предъявляемые к эмалированным проводам марки ПЭВ-2, по значению пробивного напряжения достаточно высоки.

Важнейшим преимуществом проводов марки ПЭВ является высокая механическая прочность эмалевой изоляции на истирание.

Адгезионные свойства проводов ПЭВ, как и всех других проводов с изоляцией на высокопрочных лаках, высокие. При длительном воздействии температур 125...150 °С адгезионные свойства изоляции заметно снижаются. К достоинствам проводов ПЭВ можно также отнести их стойкость к влажности и к тепловому удару. Недостатком этих проводов является низкая нагревостойкость и плохая стойкость к действию растворителей и агрессивных сред.

Алюминиевые эмалированные провода с изоляцией на поливинилацеталевом лаке марки ПЭВА выпускаются только с одной толщиной эмалевой изоляции, которая несколько меньше, чем у проводов марки ПЭВ-2, но больше, чем у проводов марки ПЭВ-1.

По механическим и электрическим параметрам эмалевой изоляции медные и алюминиевые провода с изоляцией на поливинилацеталевом лаке примерно равноценны.

Одним из основных преимуществ алюминиевых эмалированных проводов по сравнению с медными, кроме их меньшей массы, является их повышенная нагревостойкость. Температурный индекс алюминиевых эмалированных проводов может быть принят равным не 105 °C, а 120 °C. Повышенная нагревостойкость алюминиевых эмалированных проводов объясняется тем, что медь каталитически влияет на старение эмалевой изоляции, в то время как алюминий в этом отношении более пассивен.

Поливинилацеталевый лак винифлекс применяется для выпуска основной массы эмалированных проводов из сплавов сопротивления. Эти провода, как и медные, изготовляются с нормальной и повышенной толщиной изоляции, что при маркировке обозначается, соответственно, цифрами 1 и 2. Выпускаются провода из сплавов сопротивления следующих марок: ПЭВКТ-1 и ПЭВКТ-2 (твердый неотожженный константан), ПЭВКМ-1 и ПЭВКМ-2 (мягкий отожженный константан), ПЭВМТ-1 и ПЭВМТ-2 (твердый неотожженный манганин), ПЭВММ-1 и ПЭВММ-2 (мягкий отожженный манганин). Кроме того, выпускаются нихромовые провода марок ПЭВНХ-1 и ПЭВНХ-2, для изготовления которых применяется только мягкая проволока марки Х20Н80.

Качество поверхности проволоки из сплава сопротивления ниже, чем медной и алюминиевой. Необходимое качество проводов во многом достигается некоторым увеличением толщины изоляции.

Механическая прочность изоляции на истирание по сравнению с проводами марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2 несколько понижена, что, однако, не имеет решающего значения, так как эти провода применяются только для катушек и нагревательных приборов, при изготовлении которых механические нагрузки ограничены.

Специальным типом проводов, используемых для механизированной намотки статоров электродвигателей компрессоров холодильных агрегатов, являются провода марки ПЭМФ с изоляцией на основе поливинилформалевого лака.

С изоляцией на основе лака метальвин выпускаются также прямоугольные медные провода марки ПЭМП. Эти провода применяются для изготовления транспонированных обмоточных проводов, предназначенных для масляных трансформаторов и реакторов.

Провода с поливинилформалевой изоляцией несколько более стойки, чем провода с поливинилформальэтилалевой изоляцией, к действию ряда растворителей, в том числе воды, а следовательно к действию некоторых пропиточных лаков.

Круглые медные провода с полиуретановой изоляцией с температурным индексом 120 °С (класс нагревостойкости Е) выпускаются диаметром 0,05...1,60 мм (марки проводов ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2). Основным преимуществом проводов марки ПЭВТЛ с изоляцией на основе полиуретанового лака является возможность обслуживать их без предварительной зачистки эмали.

Провода предназначены для применения в приборостроительной и радиотехнической промышленности и могут также использоваться в качестве обмоток электродвигателей малой мощности. Провода марки ПЭВТЛ применяются также при высокой частоте.

Специфическими свойствами полиуретановой изоляции являются ее большая термопластичность и размягчение уже при 160 °С. Поэтому применять эмалированные провода с полиуретановой изоляцией для электрических машин большой и средней мощности, где возможны перегрузки, не рекомендуется. Электроизоляционные и физико-механические свойства проводов с полиуретановой изоляцией находятся примерно на том же уровне, что и с изоляцией на основе поливинилацеталевых лаков.

Наибольшую часть эмалированных проводов, выпускаемых для эксплуатации при 130 °С (класс нагревостойкости В), составляют провода с изоляцией из полиэфирных (полиэтилентерефталатных) лаков.

Круглые медные провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2 выпускаются диаметром 0,063...2,50 мм. Провода с полиэфирной изоляции обладают более высокой электрической прочностью по сравнению с проводами с поливинилацеталевой изоляцией.

Пониженная стойкость проводов с полиэфирной изоляцией к тепловому удару по сравнению с другими типами эмалированных проводов объясняется химической природой образующегося полимера.

Механическая прочность на истирание у проводов марки ПЭТВ несколько ниже по сравнению с проводами с поливинилацеталевой изоляцией. Полиэфирная изоляция достаточно стойка к растворителям. Медные провода с полиэфирной изоляцией прямоугольного сечения марки ПЭТВП также обладают пониженной стойкостью к тепловому удару.

С полиэфирной изоляцией выпускаются также алюминиевые круглые провода марки ПЭТВА. Эти провода имеют температурный индекс 130 °С, но фактически он выше и составляет 155 °С. По электрическим параметрам изоляции провода марки ПЭТВА и ПЭТВ равноценны, однако механическая прочность изоляции на истирание у алюминиевых проводов несколько ниже.

Для единой серии электродвигателей, намотка которых производится механизированным способом, применяются круглые провода марки ПЭТВМ. Провода марки ПЭТВМ имеют несколько большую толщину изоляции, а также лучшие механические параметры. По сравнению с обычными проводами марки ПЭТВ, провода марки ПЭТВМ обладают повышенной стойкостью к тепловому удару. По механической прочности изоляции провода марки ПЭТВМ заметно превосходят провода марки ПЭТВ.

В целях повышения стойкости к тепловому удару изоляции эмалированных проводов на полиэтилентерефталатных лаках применяется их модифицирование. При достижении этой задачи одновременно достигается повышение нагревостойкости, так как в настоящее время провода с изоляцией на основе модифицированных полиэфирных лаков имеют температурный индекс 155 °С (класс нагревостойкости F) и даже 180 °С (класс нагревостойкости Н).

Наиболее распространенным способом модифицирования является введение в состав полиэтилентерефталатного полимера имидной группы. Медные эмалированные провода с полиэфиримидной изоляцией марки ПЭТ-155 выпускаются диаметром 0,06...2,44 мм и по толщине изоляции и наружному диаметру соответствуют проводам марки ПЭТВ-2. По своим электроизоляционным параметрам провода марки ПЭТ-155 идентичны проводам ПЭТВ, однако имеют существенно лучшую нагревостойкость и повышенную стойкость к действию теплового удара.

Полиэфиримидная изоляция по сравнению с полиэфирной в меньшей степени подвержена действию термической деструкции. Электрическая прочность полиэфиримидной изоляции в меньшей степени, чем полиэфирной, зависит от температуры.

Механическая прочность изоляции проводов марки ПЭТ-155 находится примерно на уровне проводов марки ПЭТВ. С изоляцией на основе полиэфиримидного лака выпускаются также медные провода прямоугольного сечения марок ПЭЭИП1-155, ПЭЭИП2-155 соответственно с толщиной изоляции по типам 1 и 2.

Аналогичные провода прямоугольного сечения выпускаются под маркой ПЭТП-155. Эти провода отличаются рядом технических характеристик.

С изоляцией на основе полиэфиримидного лака выпускаются также алюминиевые и алюмомедные провода. Алюминиевые провода выпускаются марки ПЭЭА-155. Изоляция этих проводов достаточно эластична.

Алюмомедные провода с изоляцией на полиэфиримидной основе имеют марку ПЭТАМ-155.

Более высокие параметры по сравнению с проводами марки ПЭТ-155 имеют круглые провода марки ПЭТМ-155 с изоляцией на основе полиэфирциануратимидного лака, предназначенные для обмоток электродвигателей единой серии с температурным индексом 155 °С. Фактически температурный индекс проводов марки ПЭТМ-155 несколько превышает 155 °С.

Изоляция проводов марки ПЭТМ-155 обладает высокой механической прочностью.

В настоящее время в связи с развитием холодильной техники требуются эмалированные провода с температурным индексом 155 °С для эксплуатации в среде хладона. В то же время намотка обмоток электродвигателей компрессоров холодильных машин производится механизированным способом, а это предъявляет к изоляции, кроме хладоностойкости, требования связанные с обеспечением повышенной механической прочности.

Для этой цели применяются провода марки ПЭФ-155, которые отличаются от проводов марки ПЭТМ-155 только тем, что удовлетворяют специальным требованиям по хладоностойкости. Провода марки ПЭФ-155 имеют высокую механическую прочность, достаточную для механизированной намотки, а также относительное удлинение и упругость.

В последнее время за рубежом расширяется выпуск эмалированных проводов с модифицированной изоляцией, обслуживание которых выполняется без предварительной зачистки изоляции. Эти провода имеют температурный индекс 155 °С. В отечественной практике круглые провода такого типа выпускаются под марками ПЭУ1-155 и ПЭУ2-155, ПЭВТЛ-155.

К специфическим недостаткам эмалированных проводов с полиуретановой изоляцией, имеющих температурный индекс 120 °С, относятся: сравнительно невысокая механическая прочность изоляции на

истирание и недостаточная стойкость к продавливанию при повышенных температурах. С этой точки зрения провода типа ПЭУ имеют повышенные характеристики.

Провода марки ПЭТ-180 имеют эмаль на полиэфирной основе. Эти провода обладают высокой нагревостойкостью и стойкостью к действию агрессивных сред, но при воздействии теплового удара наблюдается небольшое снижение механической прочности.

Медные круглые провода марки ПЭТ-200 и медные прямоугольные марки ПЭТП-200 имеют температурный индекс 200 °С. Они эмалируются полиамидимидным лаком.

Кроме высокой нагревостойкости полиамидимидные лаки обеспечивают получение покрытий с механической прочностью, превышающей даже прочность на основе поливинилформалевой изоляции. Эти провода по сравнению с проводами ПЭТ-155 имеют пониженную стойкость к растяжению и худшую адгезию эмалевой пленки к меди. Последний фактор является причиной трудного обеспечения совместимости этого провода с пропиточными составами. Провода марки ПЭТ-200 обладают высокой химостойкостью, стойкостью к тепловому удару и хорошей термоэластичностью.

Провода, эмалируемые лаками на полиимидной основе, обеспечивают температурный индекс их изоляции 220 °С. Такие провода выпускаются двух марок – ПЭТимид и ПНЭТимид. У проводов марки ПНЭТимид медная проволока покрыта никелем для защиты ее от окисления, что позволяет использовать этот провод для изготовления обмоток, рабочая температура которых достигает 300 °С. Изоляция проводов ПЭТимид и ПНЭТимид отличается хорошей эластичностью и высокой стойкостью к тепловым ударам, устойчива к действию растворителей и агрессивных сред, к воздействию радиации. Недостаток – пониженная механическая прочность. Основные свойства обмоточных проводов приведены в табл. 4.1.

Хорошие перспективы развития имеют эмалированные провода с дополнительным клеящим слоем. К таким проводам относятся: ПЭВТЛД – эмалированный провод с полиуретановой изоляцией и клеящим слоем на основе поливинилбутираля; ПЭТКД – эмалированный провод с полиэфиримидной изоляцией и клеящим слоем на основе модифицированного полиамида; ПНЭТ-имид Д – эмалированный провод с полиимидной изоляцией и клеящим слоем на основе полиамида.

Способность этих проводов склеиваться под воздействием повышенной температуры позволяет исключить из технологии производ-

Таблица 4.1

Основные параметры эмалированных проводов

Марка провода	Российский (международный) стандарт	Конструкция провода	Диапазон размеров, мм	Температурный индекс, °С	Специализация
ПЭВТЛ-1, -2	ТУ 16-505.446-77 (МЭК 60317-4)	Провода медные круглого сечения, изолированные полиуретановой эмалью	0,020...0,050	130	Лудящиеся без зачистки изоляции
ПЭТВ-1	ТУ 16-705.110-79 (МЭК 60317-34)	Провода медные круглого сечения, изолированные полиэфирной эмалью, с утоненной изоляцией	0,060...1,600		Высокая электрическая прочность
ПЭТВ-2		То же, с утолщенной изоляцией	0,060...2,500		
ПЭТВМ		То же, с утолщенной изоляцией, пригодные для механизированного способа намотки	0,250...1,400		Высокая механическая прочность
ПЭЭА-130	ТУ 16.К09-077-93	Провода алюминиевые круглого сечения, изолированные полиэфирной эмалью	1,250...3,000		Трансформаторы, электрическая пусковая аппаратура
ПЭТВП	ТУ 16-705.457-87	Провода медные прямоугольного сечения, изолированные полиэфирной эмалью	2,5...25 $мм^2$		Электрические машины средней мощности

Продолжение табл. 4.1

Марка провода	Российский (международный) стандарт	Конструкция провода	Диапазон размеров, мм	Температурный индекс, °С	Специализация
ПЭТКД	ТУ 16.705.354-84	Провода медные круглые с основной изоляцией на основе полиэфиримидного лака, с клеящим слоем на основе полиамидного лака	0,060...0,450 $мм^2$	130	Образуют монолитное изделие без применения пропиточных составов
ПЭТ-155	ТУ 16.К71-160-92 (МЭК 60317-3)	Провода медные круглого сечения, изолированные полиэфиримидной эмалью	0,063...2,500	155	Повышенная теплостойкость
ПЭТМ-155	ТУ 16-505.173-80 (МЭК 60317-3)	То же, с утолщенной изоляцией, пригодные для механизированного способа намотки	0,050...2,000		
ПЭФ-155	ТУ 16-505.673-77 (МЭК 60317-3)	То же, изолированные модифицированной полиэфиримидной эмалью	0,063...1,800		Пригодны для работы в среде фреонов
ПЭЭИП	ТУ 16-705.414-86 (МЭК 60317-16)	Провода медные прямоугольного сечения, изолированные полиэфиримидной эмалью	2,5...25 $мм^2$		Электрические машины средней мощности

Продолжение табл. 4.1

Марка провода	Российский (международный) стандарт	Конструкция провода	Диапазон размеров, мм	Температурный индекс, °C	Специализация
ПЭУ-155 1,2...155	ТУ 16.К71-126-91	Провода медные круглого сечения, с изоляцией на основе модифицированного полиуретанового лака, облуживающиеся без предварительной зачистки	0,063...2,500 мм^2	155	Электрические машины средней мощности
ПЭТ-180	ТУ 16.К09-97-95 (МЭК 60317-8)	Провода медные круглого сечения, изолированные полиэфиримидной эмалью	0,060...2,500	180	Электрические машины, стойкие к перегрузкам
ПЭЭИП1-180-МЭК ПЭЭИП2-180-МЭК	ТУ 16.К71-309.2001 (МЭК 60317-0-2 МЭК 60317-28)	Провода медные прямоугольные с толщиной изоляции типа 1 и 2 на основе полиэфиримидов	размер проволоки по меньшей стороне 0,5...3,55; по большей от 2,0 до 10,0		Высокие механические и тепловые характеристики; технологичность при изготовлении намоточных изделий
ПЭТД-180	ТУ 16-705.264-82	Провода медные круглого сечения с двойной изоляцией из полиэфиримидной и полиамидимидной эмали	0,200...1,400		

Окончание табл. 4.1

Марка провода	Российский (международный) стандарт	Конструкция провода	Диапазон размеров, мм	Температурный индекс, °С	Специализация
ПЭЭИД-200-МЭК	ТУ 16.К71-250-95 (МЭК 60317-13)	Провода медные круглого сечения с двойной изоляцией из полиэфиримидной и полиамидимидной эмали	0,200...1,400	200	Высокие механические и тепловые характеристики; технологичность при изготовлении намоточных изделий
ПЭТ-имид	ТУ 16.505.489-78	Провода медные круглого сечения с изоляцией на основе полиимидного лака	0,100...2,500 мм	220	–
ПНЭТ-имид		То же, с никелированной жилой		240	–

ства обмоток технологическую операцию пропитки и последующую сушку, в результате чего повышается производительность и улучшаются условия труда.

4.2. Обмоточные провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией

Ряд марок проводов с волокнистой изоляцией по ряду свойств (химостойкости, тропикостойкости, механической прочности изоляции) превосходят созданные к настоящему времени эмалированные провода. Поэтому, несмотря на их некоторые недостатки (толщина изоляции, низкая электрическая прочность) они в ряде случаев находят широкое применение. В непропитанном виде эти провода обладают сравнительно низкой электрической прочностью (практически близкой к электрической прочности воздуха соответствующей толщины), малой механической прочностью и большой гигроскопичностью. Поэтому при производстве проводов после наложения каждого слоя стекловолокна производят, как правило, пропитку, что повышает как механические, так и электрические характеристики. Для подклейки и пропитки стекловолокнистой изоляции применяются глифталевые и кремнийорганические лаки.

Обозначение марок обмоточных проводов: П – провод; Б – хлопчатобумажная обмотка; Ш – натуральный шелк; ШК или К – искусственный шелк – капрон; С – стекловолокно; А – асбестовое волокно; О или Д – указывают на один или два слоя изоляции. Если изоляция комбинированная, то второй и третьей буквой указывается ЭЛ. Например, ПЭЛБО: провод медный, покрытый лакостойкой эмалью и затем х/б пряжей в один слой. Марки обмоточных проводов, изолированных стекловолокном и пропитанных кремнийорганическим лаком, имеют в своем обозначении букву К. Например, провод марки ПСДК.

Провода с х/б, шелковой и капроновой обмотками, невлагостойкие, обладают малой нагревостойкостью (класс А). К проводам с органической волокнистой изоляцией относятся провода с двойной х/б обмоткой ПБД или с одной х/б и второй лавсановой ПЛБД. Они изолированы слоем эмали и обмоткой из х/б, шелковой, капроновой или лавсановой пряжи. Все эти провода, а также алюминиевые (АПБД, АПБ и др.), прямоугольные (ППЛБО, ППТБО и др.) относятся к классу нагревостойкости А. Вследствие малой нагревостойкости для обмоток электрических машин находят ограниченное применение.

Таблица 4.2

Основные параметры проводов с волокнистой, стекловолокнистой изоляцией

Марка	Российский стандарт	Конструктивные особенности	Размер, мм	Температурный индекс, °С	Специализация
ПБД	ТУ 16.К28-001-90	Провод медный круглый или прямоугольный с двойной обмоткой хлопчатобумажной тканью	–	105	–
ПЭШО	ТУ 16.К71-118-91	Провод круглый или прямоугольный с медной эмалированной жилой с обмоткой шелковой пряжей	–		–
ПСДТ		Провод медный круглый или прямоугольный с утоненной изоляцией из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	∅1,0...5,0 прямоугольн. $S = 2...50$ мм^2	155	Электрические машины широкого профиля
ПСЛД		Провод медный круглый или прямоугольный с изоляцией из стеклополиэфирных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком			Высокая механическая прочность изоляции
ПСЛДТ		Провод медный круглый или прямоугольный с утоненной изоляцией из стеклополиэфирных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком			

Продолжение табл. 4.2

Марка	Российский стандарт	Конструктивные особенности	Размер, мм	Температурный индекс, °C	Специализация
ПСДКТ	ТУ 16.К71-129-91	Провод медный круглый или прямоугольный с утоненной изоляцией из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	∅1,0...5,0 прямоугольн. $S = 2...50$ мм^2	200	Высокая теплостойкость изоляции
ПСЛДКТ	ТУ 16.К71-129-91	Провод медный круглый или прямоугольный с утоненной изоляцией из стеклополиэфирных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	∅1,0...5,0 прямоугольн. $S = 2...50$ мм^2	200	Высокая механическая прочность и теплостойкость изоляции
АПСД	ТУ 16.К71-257-96	Провод алюминиевый круглый или прямоугольный с изоляцией из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	∅1,0...3,0 прямоугольн. $S = 5...70$ мм^2	155	Трансформаторы, электропусковая аппаратура
АПСЛД	ТУ 16.К71-257-96	Провод алюминиевый круглый или прямоугольный с изоляцией из стеклополиэфирных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	∅1,0...3,0 прямоугольн. $S = 5...70$ мм^2	155	Высокая механическая прочность изоляции
АПСДК	ТУ 16.К71-257-96	То же, с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	∅1,0...3,0 прямоугольн. $S = 5...70$ мм^2	200	Высокая теплостойкость изоляции

Продолжение табл. 4.2

Марка	Российский стандарт	Конструктивные особенности	Размер, мм	Температурный индекс, °C	Специализация
ПЭТВСД	ТУ 16.К71-020-96	Провод медный круглый или прямоугольный, изолированный теплостойкой высокопрочной эмалью с ТИ 130 и двумя слоями обмотки из стеклянных нитей с пропиткой теплостойким лаком	∅0,85...2,50 прямоугольн. S = 2...25 мм^2	155	Тяговые электродвигатели, машины повышенной надежности
ПЭТВСЛД		Провод медный круглый или прямоугольный, изолированный теплостойкой высокопрочной эмалью с ТИ 130 и двумя слоями обмотки из стеклополиэфирных нитей с пропиткой теплостойким лаком			Высокая механическая прочность
ПЭТВСДТ		То же, с утоненной изоляцией	1,32 × 5,60 3,55 × 7,10 4,00 × 5,60		Электрические машины повышенной надежности, тяговые электродвигатели
ПЭТСД		Провод медный круглый или прямоугольный, изолированный теплостойкой высокопрочной эмалью с ТИ 155 и двумя слоями обмотки из стеклянных нитей с пропиткой теплостойким лаком	∅0,85...2,50	прямоугольн. S = 2...25 мм^2	180

Окончание табл. 4.2

Марка	Российский стандарт	Конструктивные особенности	Размер, мм	Температурный индекс, °C	Специализация
ПЭТСЛД	ТУ 16.К71-020-96	Провод медный круглый или прямоугольный, изолированный теплостойкой высокопрочной эмалью с ТИ 155 и двумя слоями обмотки из стеклополиэфирных нитей с пропиткой теплостойким лаком	∅0,85...2,50 прямоугольн. $S = 2...25$ мм^2	180	Высокая механическая прочность
ПОЖ	ТУ 16.505-399-77	Провод круглый или прямоугольный с медной никелированной жилой с двумя слоями стекловолокна с пропиткой органосиликатным составом	–	до 600	–
ПОЖ-700	То же		–	до 700	–

Широкое применение находят провода со стекловолокнистой изоляцией, которая в зависимости от типа подклеивающего состава и типа пропитывающего состава относится к классам F или H.

В электрических машинах наиболее широко используются провода со стекловолокнистой изоляцией, которые отличаются повышенной нагревостойкостью, электрической и механической прочностью и стойкостью к кратковременному превышению температуры.

Данные по характеристикам проводов приведены в табл. 4.2.

4.3. Обмоточные провода с пленочной и пластмассовой изоляцией

Обмоточные провода с пленочной изоляцией используются для обмоток электрических машин, работающих в специфических условиях одновременного воздействия нагрева, вибрации, агрессивных сред, влажности и др., в погружных двигателях обмотки подвергаются воздействию жидкой среды.

Условия работы погружного электродвигателя в скважине небольшого диаметра (до 425 мм) определяют особенности его конструкции — малый диаметр при большой длине, полностью закрытый паз. Подобная конструкция паза статора требует изготовления обмотки методом многократной протяжки провода, поэтому изоляция провода должна иметь высокую механическую прочность.

Один из первых типов обмоточных проводов для таких условий — провод с комбинированной эмалевой и пленочно-волокнистой изоляцией, использованный для обмоток с напряжением 1000...2000 В, ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4. Изоляция этих проводов состоит из слоя полиэтилентерефталатной эмали, трех (четырех) слоев лавсановой пленки и двух слоев лавсановой нити с подклейкой и пропиткой полиэфирной смолой. Недостатком этих проводов являются низкая нагревостойкость, их температурный индекс 120 °С. Провода типа ПЭТВПДЛ успешно заменяются нагревостойкими проводами со спеченной пленочной фторопластовой и полиимидно-фторопластовой изоляцией, которые могут эксплуатироваться в водозаполненных электродвигателях на напряжение 380 В, работающих в среде воды и пластовой жидкости при температуре +180 °С и давлении до 20 МПа. Некоторые марки нагревостойких обмоточных проводов для погружных, тяговых двигателей, а также специальных электрических машин, представлены в табл. 4.3. и 4.4.

Таблица 4.3

Основные параметры проводов с пленочной изоляцией

Марка провода	Конструктивные особенности	ТИ, °С
ППИ-У	Провод медный круглый с изоляцией из полиимидно-фторопластовой пленки	200
ППИ-П	То же, с прямоугольной проволокой	200
ППИК-Т	То же, с номинальной удвоенной толщиной 0,16 мм	200
ППИК-1	То же, с номинальной удвоенной толщиной 0,16 мм	200
ППИК-2	То же, с номинальной удвоенной толщиной 0,30 мм	200
ППЛБО	То же, с изоляцией из 3-х слоев лавсановой пленки и одного слоя хлопчатобумажной пряжи с общей удвоенной толщиной 0,48...0,53 мм	105
ППЛЛО	То же, с наружным слоем из полиэфирной пряжи	155
ПЭТПВПДЛ-3	Эмалированный медный провод с изоляцией из 3-х слоев лавсановой пленки и 2-х слоев лавсановой нити с подклейкой и пропиткой лаком с последующей тепловой обработкой	155
ПЭТПВПДЛ-4	То же, с изоляцией из 4-х слоев лавсановой пленки и 2-х слоев лавсановой нити с подклейкой и пропиткой лаком с последующей тепловой обработкой	155

Таблица 4.4

Основные параметры проводов с пластмассовой изоляцией

<table>
<tr><th>Марка провода</th><th>Конструктивные особенности</th><th>ТИ, °C</th><th>ТУ</th></tr>
<tr><td>ПЭВВП</td><td>Медный эмалированный провод с изоляцией из слоя полиэтилена высокой плотности</td><td rowspan="9">105</td><td rowspan="3">16.505.733-78</td></tr>
<tr><td>ПВДП</td><td>То же, с одно- или многопроволочной жилой с двухслойной изоляцией из полиэтилена низкой и высокой плотности</td></tr>
<tr><td>ПЭПВ-80</td><td>То же, что и ПЭВВП</td></tr>
<tr><td>ППВ-80</td><td>То же, что ПВДП</td><td rowspan="6">16.К71.024-88</td></tr>
<tr><td>ПЭПТВ-100</td><td rowspan="2">Медный с однопроволочной жилой с изоляцией из слоя эмали и слоя блоксополимера пропилена с этиленом</td></tr>
<tr><td>ПЭПВ-100</td></tr>
<tr><td>ППТВ-100</td><td rowspan="3">Медный с одно- или многопроволочной жилой с двухслойной изоляцией из полиэтилена высокой плотности слоя блоксополимера пропилена с этиленом</td></tr>
<tr><td>ППВ-100</td></tr>
<tr><td>ППВМ</td></tr>
<tr><td>ППФИ</td><td>Медный с изоляцией из фторопласта Ф-4 и полиимидно-фторопластовой пленки</td><td>155</td><td>16.505.374-72</td></tr>
</table>

Глава 5
ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭМАЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ

5.1. Оборудование для производства эмалированных проводов

5.1.1. Способы наложения эмаль-лаков на провод

Эмалирование проволоки представляет собой процесс нанесения жидкого лака на поверхность проволоки с последующей тепловой обработкой в электрической печи, при которой образуется твердое изоляционное покрытие. Процесс нанесения жидкого лака (смолы) на проволоку оказывает большое влияние на качество покрытия. Однородность, толщина, адгезия лака к проволоке связаны с качеством поверхности проволоки, т. е. чистотой ее поверхности, стабильностью ее формы и гладкостью, а также с физико-химическими свойствами лака.

Лаки должны иметь определенное поверхностное натяжение и угол смачивания.

Силы поверхностного натяжения (P) при постоянном объеме и температуре создают избыточное давление, обратно пропорциональное радиусу кривизны поверхности, т. е.

$$P = \frac{2\sigma}{\rho}, \tag{5.1}$$

где σ – поверхностное натяжение, Дин/см; ρ – радиус кривизны поверхности.

Вследствие кривизны поверхностного слоя в жидкости создается избыточное давление, которое стремится сократить площадь поверхности и может вызвать перераспределение жидкости на проводе. Эти процессы проявляются при эмалировании прямоугольных проводов и проводов овальной формы. При такой форме проводов лак смещается на плоские участки поверхности (с большим радиусом кривизны), где образуется изоляция повышенной толщины. Особенно опасно на-

личие на поверхности проволоки рисок, заусенцев, толщина изоляции на которых будет минимальна, а значит провода не будут выдерживать электрические и механические испытания.

Поверхность проволоки должна быть тщательно очищена от остатков волочильной эмульсии, металлической пыли и на ней не должно быть окислов. Все это сказывается на величине адгезии ($W_{тж}$) лака к поверхности проволоки, т. к.

$$W_{тж} = \sigma_{жв}(1 + \cos\theta), \tag{5.2}$$

где $\sigma_{жв}$ – поверхностное натяжение жидкости; θ – краевой угол смачивания.

При $\theta \to 0$ $W_{тж}$ увеличивается, пленка лака на проволоке будет иметь минимальную толщину, а при $\theta \to 90°$ смачивание проволоки будет незначительным и на ее поверхности появятся места, не покрытые лаком. Поэтому для качественного покрытия проволоки краевой угол должен находиться в определенных пределах.

Нанесение лака на провод (эмалирование) может проводиться несколькими методами:

- погружением;
- с помощью фетровых или замшевых обжимов;
- с помощью металлических калибров;
- методом электрофореза и т. д.

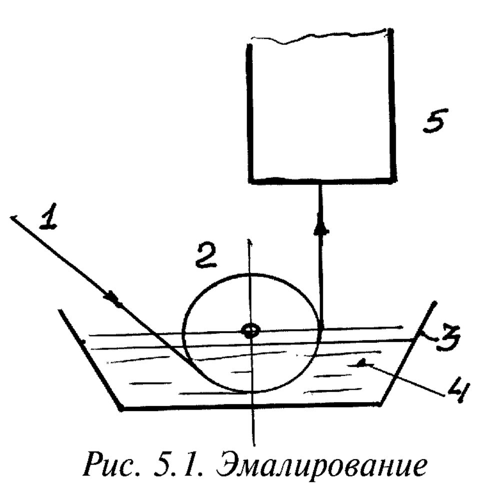


Рис. 5.1. Эмалирование погружением:
1 – проволока; 2 – направляющий ролик; 3 – эмаль-ванна; 4 – лак; 5 – электрическая печь

Эмалирование погружением (рис. 5.1) заключается в том, что провод *1* с помощью направляющих роликов *2* погружается в ванну с лаком *3*, *4*, затем покрытая некоторым количеством лака проволока поступает в электрическую печь. После термообработки в печи на проволоке образуется тонкий слой эмалевой изоляции. Этот метод применим при использовании маловязких, содержащих низкотоксичные растворители, масляных лаков для эмалирования проводов диаметром больше 0,41 мм. В настоящее время, ввиду ограниченного применения масляных лаков, метод погружения применяется крайне редко.

При применении вязких синтетических лаков необходимы калибрующие устройства, регулирующие и устанавливающие некоторую толщину слоя лака на проволоке. Такими наиболее простыми калибрующими устройствами являются фетровые и замшевые обжимы, с помощью которых накладываются лаки на провода диаметром не более 0,2 мм (рис. 5.2). При эмалировании проволоки больших диаметров этот метод не обеспечивает одинаковой толщины покрытия по периметру из-за неравномерного усилия обжатия фетром провода.

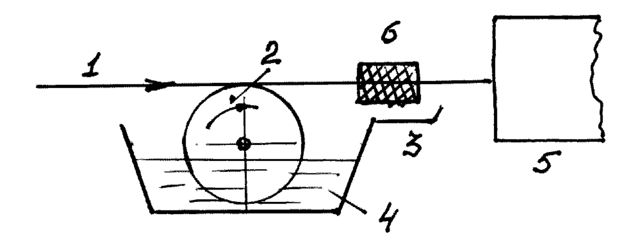


Рис. 5.2. Эмалирование с помощью фетровых обжимов:
1 – проволока; 2 – лаконаносящий ролик; 3 – эмаль-ванна; 4 – эмаль-лак; 5 – эмаль-печь; 6 – фетровые обжимы

Наиболее широко применяется эмалирование с помощью неразъемных металлических калибров (рис. 5.3). Калибр состоит из стальной оправки *6* и вставки из твердого сплава *7* и имеет различную конструкцию. Канал калибра может иметь коническую форму с углом конусности до 6° или коническую форму с цилиндрической вставкой на выходе.

С помощью калибров эмалируются провода круглого профиля диаметром 0,1 и более мм и провода прямоугольного сечения.

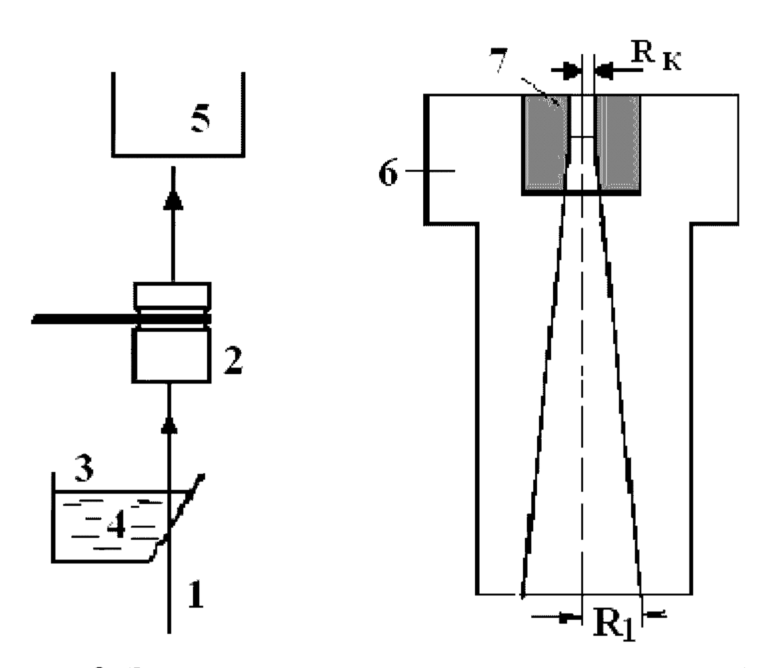


Рис. 5.3. Эмалирование с помощью неразъемных обжимов:
1 – проволока; 2 – калибр; 3 – эмаль-ванна; 4 – эмаль-лак; 5 – эмаль-печь; 6 – оправка; 7 – вставка

Для нанесения покрытия используется водная суспензия неорганического материала. Толщина слоя покрытия регулируется путем изменения силы тока.

Не нашел в эмальпроизводстве применения метод электростатического нанесения порошкообразных материалов.

В отечественной и мировой практике используется метод эмалирования из расплава смол. Смолы в расплавленном состоянии наносятся на проволоку с помощью металлических калибров с последующей термообработкой. Требуемая толщина эмалевой изоляции наносится за несколько проходов провода через лаковую ванну и эмальпечь.

5.1.2. Эмаль-агрегаты

В 1990 году отечественная кабельная промышленность выпускала около 175 тысяч тонн эмалированных проводов, после экономического кризиса в 2005 году выпуск проводов сократился до 35 тысяч тонн. Для дальнейшего подъёма выпуска проводов необходимо было перевооружить производство современными агрегатами передовых западных фирм. К 2005 году их количество увеличилось более чем в два раза: можно считать, что качество современных отечественных заводов отвечает требованиям различных международных стандартов.

Эмалирование проводов реализуется на специальном оборудовании – эмаль-агрегатах. На агрегатах в несколько проходов одновременно могут эмалироваться одна, две или несколько проволок и соответственно агрегаты называются одно-, двух- и многоходовыми. Причем агрегаты с горизонтально расположенной печью считаются *горизонтальными,* а с вертикально расположенными печами – *вертикальными.*

Агрегаты классифицируются также по диаметру эмалируемых проводов. Причем градация агрегатов по диаметру проводов в различных фирмах и странах не одинакова. На отечественных заводах эксплуатируется разнообразный парк агрегатов как отечественного, так и зарубежного производства.

Рассмотрим, прежде всего, современные эмаль-агрегаты. Учитывая большое разнообразие их конструкций и основных узлов, остановимся на характерных признаках современных эмаль-агрегатов.

Горизонтальные эмаль-агрегаты применяются в основном для эмалирования проводов диаметром 0,015...0,8 мм; ***вертикальные*** – для проводов диаметром 0,8...5,8 мм или проводов прямоугольного профиля сечением до 80 мм^2.

1. Диаметр ***тончайшей проволоки*** 0,015...0,05 мм (вертикальные или горизонтальные): ЭТ-2 горизонтальный – 0,02...0,04 мм, нанесение с помощью замшевых обжимов; венгерские ПГЗ-2/5 – 0,025...0,050 мм; агрегаты итальянской фирмы SICME (аналог ПГЗ-2/5); NORE-MF/12 – 0,02...0,05 мм (горизонтальный); австрийская фирма MAG – 0,03...0,09 мм (одновременно 40 проходов, $V = 220$ м/мин).
2. ***Тонкое волочение*** – диаметр 0,05...0,29 мм. Горизонтальные – диаметр проволоки 0,05...0,09 мм (ЭТ-8), вертикальные – 0,10...0,29 мм (М-24) и 0,20...0,41 мм (С-24) (последние не имеют печей отжига); НОРЕ-128 и НОРЕ-192 (Италия, фирма «Сикме») – 0,05...0,14 мм.
3. ***Диаметр 0,3 мм и выше***: станки отечественные, вертикального типа диаметром 0,3...2,5 мм – Б-30, диаметром 1,16...2,50 мм – Г-20; «СИКМЕ» (Италия) – 0,3...1,1 мм.
4. ***Прямоугольные провода*** – агрегат ВРЕЖП-36 («Сикме», Италия) для эмалирования проволоки сечением от 3,1 до 62,5 мм^2, 9 проходов [1].

В отечественной промышленности наибольшее признание получили эмаль-агрегаты фирмы MAG (Австрия), обеспечивающие производство от ультратонких проводов для микроэлектроники до средних эмаль-проводов для двигателей и компрессоров.

Горизонтальные эмаль-агрегаты позволяют выпускать провода диаметром 0,012...0,7 мм и совмещаются с волочением.

Вертикальные машины предназначены для производства средних размеров круглых и прямоугольных проводов для трансформаторов.

Серия эмаль-агрегатов «Mozart» имеет самые высокие показатели VD, главное управление основано на ПК с хранением и графическим представлением данных. Эти машины идеальны для производства больших партий в короткие сроки.

Schubert

HORIZONTAL

mm 0.018 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

H3 0.15 - 0.35 mm H 5 0.3 - 0.8 mm

H 4 0.2 - 0.5 mm H 6 0.5 - 1.2 mm

VERTICAL

mm 0.4 1 2 3 4 5 6

V 6 0.5 - 2.0 mm V 7 1.0 - 4.0 mm

Серия агрегатов «Schubert» имеет средние показатели VD, легкое управление, высокие показатели выпуска в зависимости от материала. Эти эмаль-агрегаты рекомендуются для производства малых партий с частой сменой диаметров.

Strauss

HORIZONTAL

mm 0.018 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

H 4 0.2 - 0.5 mm H 5 0.3 - 0.8 mm

HORIZONTAL

mm 0.018 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

H 4 0.2 - 0.5 mm H 5 0.3 - 0.8 mm

Серия «Strauss» имеет сдвоенную конфигурацию (2 хода в одной камере). Эти машины предпочтительнее для производства больших партий проводов с использованием материалов, не предназначенных для высоких скоростей. Используемые проводниковые материалы: медь, алюминий и другие. Используемые полимерные материалы: ПУ-полиуретановые эмаль-лаки, ПЭ-полиэфирные, ПЭИ-полиэфиримидные, ПАИ-полиамидимидные.

В состав агрегатов входят следующие узлы (устройства):

1. Отдающее устройство.
2. Печь отжига.
3. Система лакоподачи, лаковая ванна.
4. Эмаль-печь с системой каталитического сжигания паров растворителя, роликов и охлаждения проводов.
5. Тяговое и приемное устройства.

Дополнительно агрегаты могут оснащаться устройствами очистки, охлаждения, сушки проволоки (после отжига), волочения и ее промазки, а также пультом и компьютером для контроля и регулирования технологического режима эмалирования. В качестве примера рассмотрим горизонтальный агрегат HN4/N-8/8+4D. Его главные показатели представлены в табл. 5.1. Общий вид горизонтального эмаль-агрегата представлен на рис. 5.4.

Таблица 5.1

Основные параметры эмаль-агрегата HN4/N-8/8+4D

№ п/п	Показатели	Величины
1	Диаметр заготовки, мм	1,269...1,4
2	Диаметр эмаль-проводов, мм	0,25...0,7
3	Количество ходов	8
4	Количество проходов	12 (8+4)
5	Скорость эмалирования, м/мин	0...280
6	Длина камеры печи, м	4
7	Волочильные приставки с числом тяговых шайб (max)	9

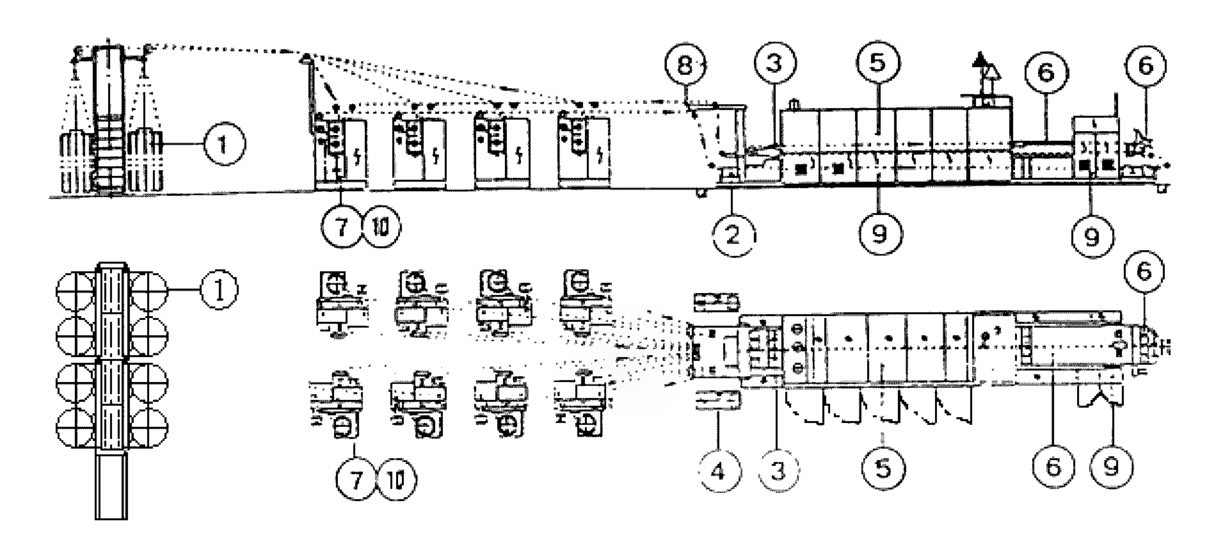


Рис. 5.4. Общая схема эмаль-агрегата HN-4:

1 – отдающее устройство (катушки, контейнеры); 2 – подготовка провода, отжиг; 3 – лаковый узел; 4 – бак эмаль-лака, система подачи эмаль-лака; 5 – эмаль-печь; 6 – охладитель провода, отклоняющие ролики; 7 – волочильная приставка; 8 – парафиновый узел; 9 – распредшкаф; 10 – приемное устройство

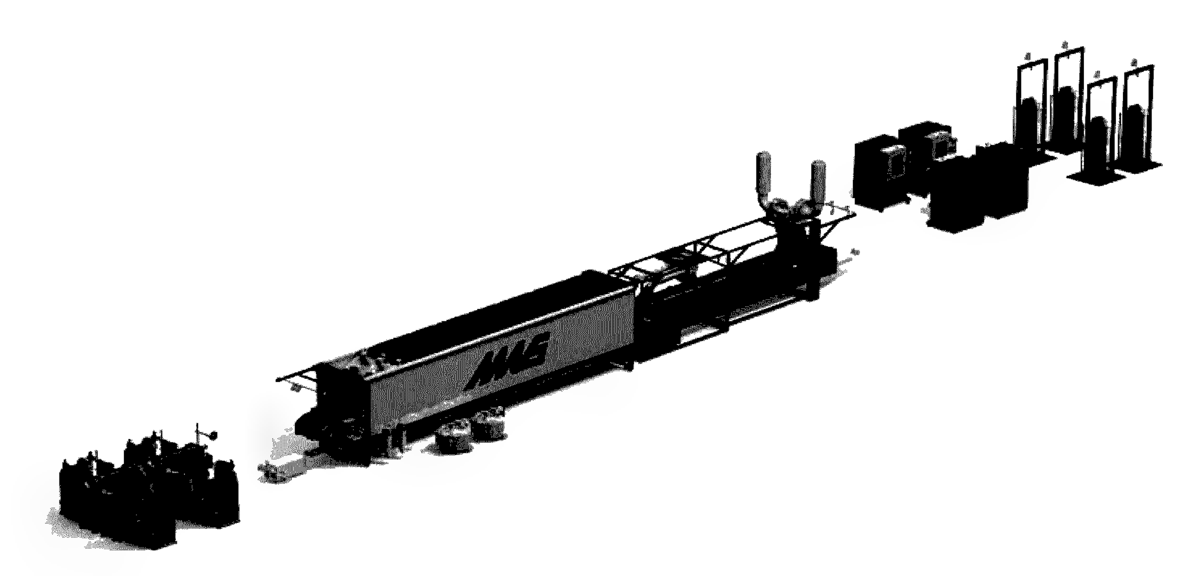


Рис. 5.5. Общий вид эмаль-агрегата Strauss H4

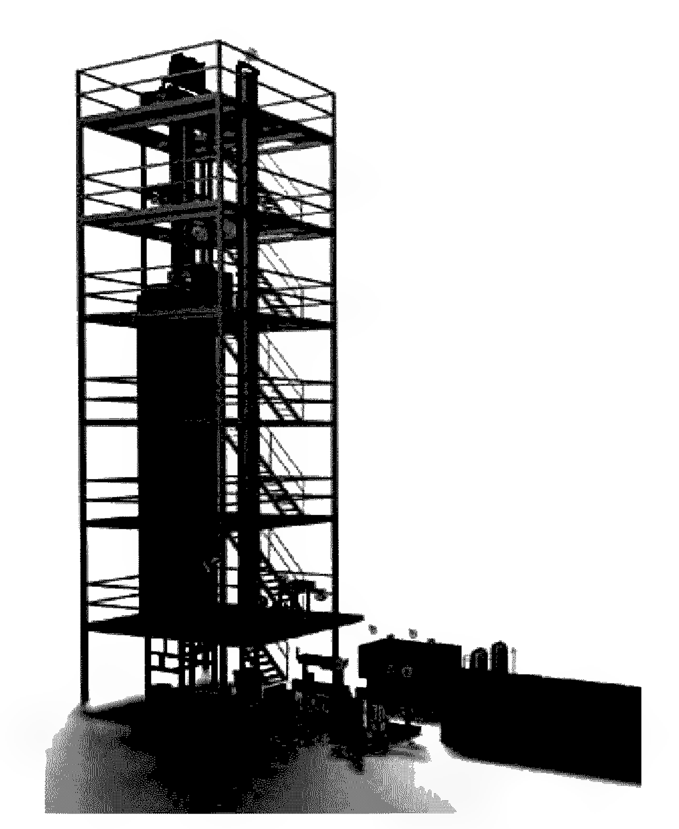


Рис. 5.6. Общий вид эмаль-агрегата Mozart V7

5.1.3. Отдающие и приемные устройства

Отдающие устройства горизонтальных агрегатов преимущественно выполняются безынерционного типа. Отдающие катушки повышенной емкости до 60 кг располагаются в основном вертикально и имеют направляющие конусы или кольца. В отдающих устройствах

фляйерного типа катушки с голой проволокой неподвижно закреплены на горизонтальной или вертикальной оси, а сматывание проволоки осуществляется с помощью легко, вращающегося под усилием натяжения провода фляйера (рис. 5.7). Фляйер имеет слабое торможение для предотвращения излишней размотки проволоки при случайных остановках.

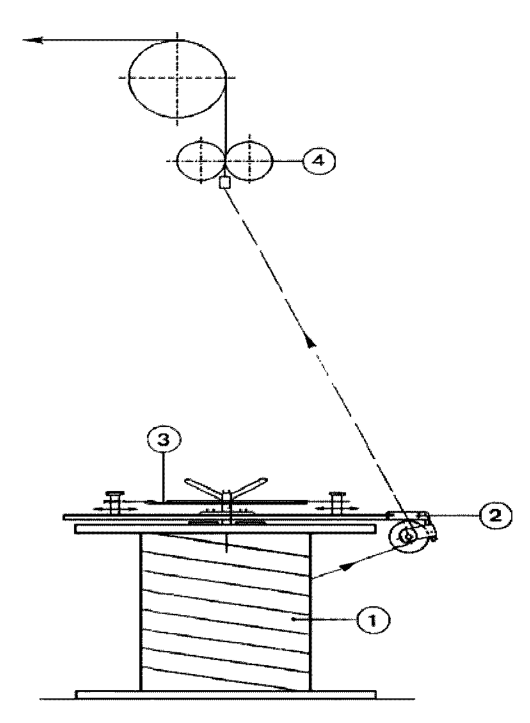


Рис. 5.7. Отдающее устройство:
1 – катушка с заготовкой;
2 – размоточное устройство (регулируемое);
3 – щеточный диск;
4 – тормозное устройство

Иногда отдающие катушки с проволокой устанавливаются на двух параллельно расположенных катках, вращающихся в шарикоподшипниках.

Катушки на таком отдающем устройстве вращаются легко, с минимальным натяжением проволоки [1].

На вертикальных агрегатах используются безынерционные, в виде контейнеров, и инерционные устройства с емкостью катушек до 300 кг. Отдающее устройство контейнерного типа, рассчитанное на 10 контейнеров, обеспечивает непрерывный съем заготовки с необходимой скоростью.

С отдающих катушек проволока через систему направляющих роликов поступает в печь отжига.

Элементы приемного устройства обеспечивают согласование скорости приема провода на катушки со скоростью эмалирования, рядовую укладку провода на катушке в соответствии с диаметром провода. Прием готового провода может проводиться на катушки цилиндрической формы емкостью 15 кг с диаметром щеки 250 мм или катушки конической формы: на 50 кг с диаметром щеки 250/400 мм; на 90 кг с диаметром щеки 315/500 мм; 190 кг с диаметром щеки 400/630 мм. Замена приемных катушек проводится с помощью специального узла, смонтированного на тележке, который может быть подвезен к любому из приемных устройств.

В современных эмаль-агрегатах используются в основном приемные устройства сдвоенного типа. Заполненная катушка может быть заменена пустой без остановки станка. При обрыве проволоки привод тягового устройства и система подачи лака автоматически выключаются.

Проволока приводится в движение тяговым устройством, которое индивидуально для каждого хода. Тяговый вал имеет канавки по числу проходов проволоки и снабжен прижимными обрезиненными роликами. Для исключения провисания проволоки, в результате ее нагрева в печи, диаметр канавок от прохода к проходу постепенно увеличивается. Разность этих диаметров для крайних канавок составляет от 0,5 до 1 мм [1].

5.1.4. Печь отжига

Перед отжигом проволока подвергается очистке. Устройство для очистки имеет две пары валков с рулонами бумаги. Провод проходит между двумя слоями бумаги и очищается от остатков соли, медной пыли и т. д. С помощью приводного двигателя и редуктора происходит перемотка бумажных роликов. Для восстановления пластических и электрических свойств проволоки после волочения ее подвергают отжигу. Отжиг каждой проволоки на агрегатах HN-4 производится в трубах печи отжига в защитной среде насыщенного пара (рис. 5.8).

Отжигу подвергается проволока диаметром 0,03 мм и более, которая проходит через индивидуальную нагревательную трубку или общую камеру. Необходимая температура отжига обеспечивается электронагревателями. Отжиг ведется в паровой среде, которая создается при прохождении горячей проволоки через водяную ванну или при помощи парогенераторов, встроенных в печь. Пар подается в печь со стороны, противоположной входу проволоки.

Печь отжига по температурному режиму нагрева разделена на три зоны:

- зона *a* – входная. Нагревается за счет тепла горячих газов, поступающих после катализатора. Температура может изменяться за счет изменения частоты вращения циркуляционного вентилятора;
- зона *b* – средняя. Обогревается газами, подогретыми электронагревателями после катализатора. Температура зоны регулируется за счет потока газа, объем которого изменяется заслонкой *D*;
- зона *c* – выходная. Нагрев выходной зоны производится с помощью электронагревателей.

Пар для печи отжига вырабатывается в парогенераторе и вводится в камеру печи со стороны, противоположной входу проволоки, что практически исключает наличие окислов на поверхности. Парогенера-

тор встроен в эмаль печи и обогревается повторно нагретым газом. Проходящий по поверхности парогенератора горячий газ нагревает испарительную трубу парогенератора. Образующийся пар в испарителе по парораспределителю поступает в каждую из восьми труб печи отжига. Вода в парогенератор подается через уровнемер, с помощью которого можно изменять поверхность испарителя.

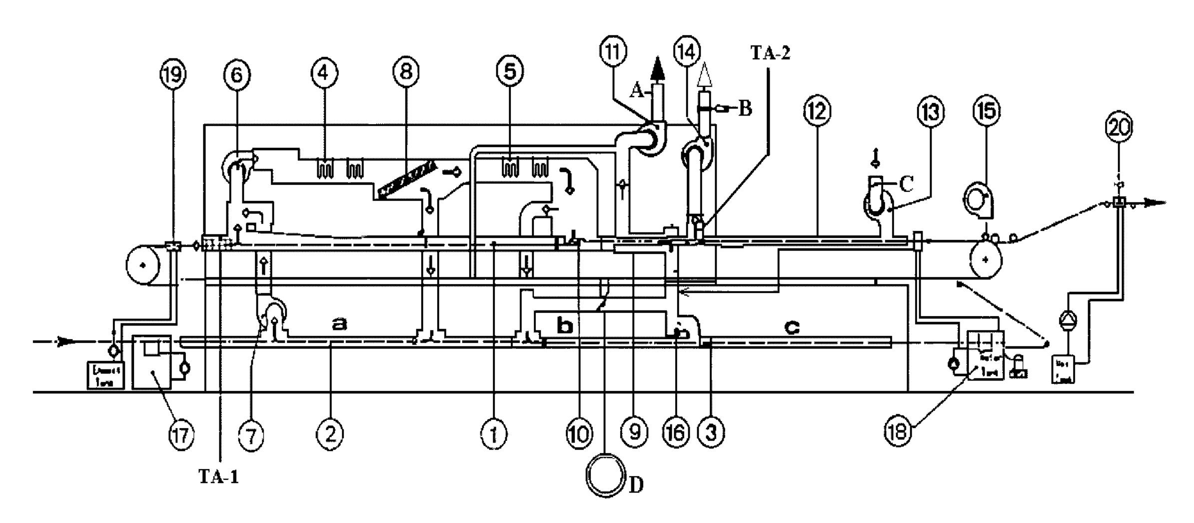


Рис. 5.8. Агрегат HN-4. Циркуляционная эмаль-печь, печь отжига и охладитель провода:

1 – реторта; 2 – печь отжига зона 1(a), 2(b), 3(c); 3 – заслонка байпаса (D); 4 – регулируемый нагрев до катализатора; 5 – регулируемый нагрев за катализатором; 6 – циркуляционный вентилятор эмаль-печи; 7 – циркуляционный вентилятор печи отжига; 8 – катализатор; 9 – теплообменник; 10 – зона смешивания; 11 – вытяжной вентилятор; 12 – охладитель провода; 13 – вентилятор охлаждения провода Напор; 14 – вентилятор охлаждения провода Всас; 15 – охладитель роликов; 16 – парогенератор; 17 – узел очистки подтяжки; 18 – узел охлаждения подтяжки; 19 – лаковый узел; 20 – парафиновый узел; А – очистка отработанного воздуха; В – заслонка охлаждения провода Всас; С – заслонка охлаждения провода Напор; D – заслонка байпаса печи отжига (зона а)

При выходе из печи отжига проволока попадает в устройство охлаждения, где производится охлаждение проволоки обессоленной водой и ее сушка. Длина участка охлаждения может регулироваться.

Эмаль-агрегат типа ВРЕ-144 имеет печь отжига с принудительной циркуляцией пара, схема которой показана на рис. 5.9. Отжиг проволоки происходит в среде, насыщенной перегретым паром. Теплота передается к проволоке как конвекцией, так и за счет излучения от стенок камеры печи. Это позволяет осуществлять отжиг проволоки при более низкой температуре нагревательных элементов *2*, чем та, которая необходима в случае применения традиционных трубчатых печей без циркуляции. Кроме того, при остановке эмаль-агрегата исключается

опасность перегорания проволоки в печи отжига. Циркуляция пара обеспечивает равномерное распределение температуры по ширине и длине камеры.

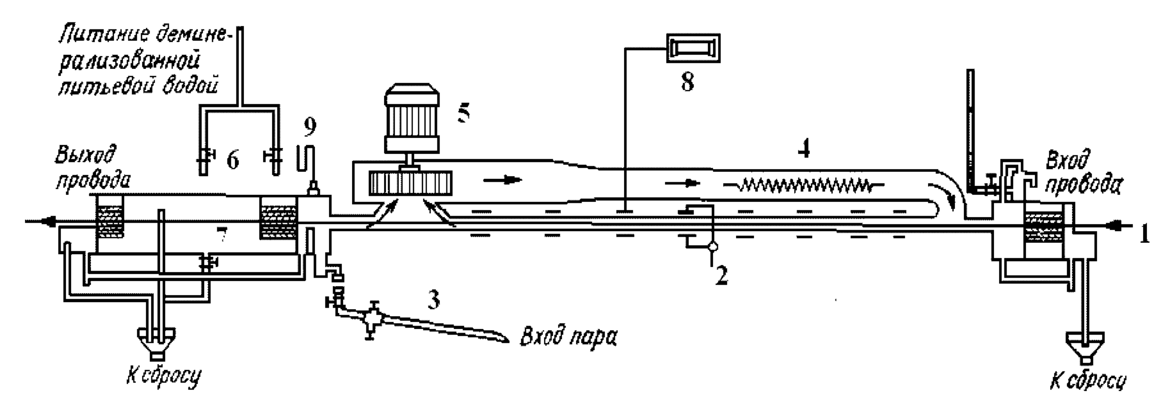


Рис. 5.9. Схема печи отжига к эмаль-агрегату ВРЕ-144

В описываемой печи отжига пар от отдельных парогенераторов или от централизованного паропровода подается к отверстиям, расположенным на выходе проволоки из камеры отжига *3*. Регулировка подачи пара производится с помощью редуктора давления *9*. Поданный пар всасывается вентилятором *5* и направляется в верхнюю камеру *4*, где расположены электрические нагреватели для перегрева пара, который подается в камеру отжига, а затем с помощью того же вентилятора обеспечивается принудительная циркуляция пара в трубе отжига. В целях предотвращения подсоса наружного воздуха в печь отжига и ограничения потерь пара отверстия для входа и выхода провода закрываются с помощью целлюлозных губок, пропитанных водой, в связи с этим в системе циркуляции пара создается повышенное давление.

Линия VS-900 так же имеет вертикальную печь отжига, оснащенную системой электродвигателей и парогенератором. Из парогенератора пар под давлением до 5 Бар подается в нижнюю часть печи и выравнивает температуру по объему. После отжига проволока охлаждается в водяной ванне, и поверхность ее подвергается сушке.

5.1.5. Система подачи лака

Система подачи лака служит для покрытия проволоки эмаль-лаком и включает в себя: индивидуальный расходный бак емкостью от 50 до 150 л; электронасос для перекачки лака; не менее двух фильтров; термостат. Такая система обеспечивает непрерывную циркуляцию и очистку лака. В горизонтальных агрегатах дозирование лака

в эмаль-ванны производится мембранными насосами. Для стабилизации вязкости лака ванны или системы оснащаются электронагревателями или термостатами *3*, *4*, поддерживающими температуру лака в пределах 35...50 °С (рис. 5.10).

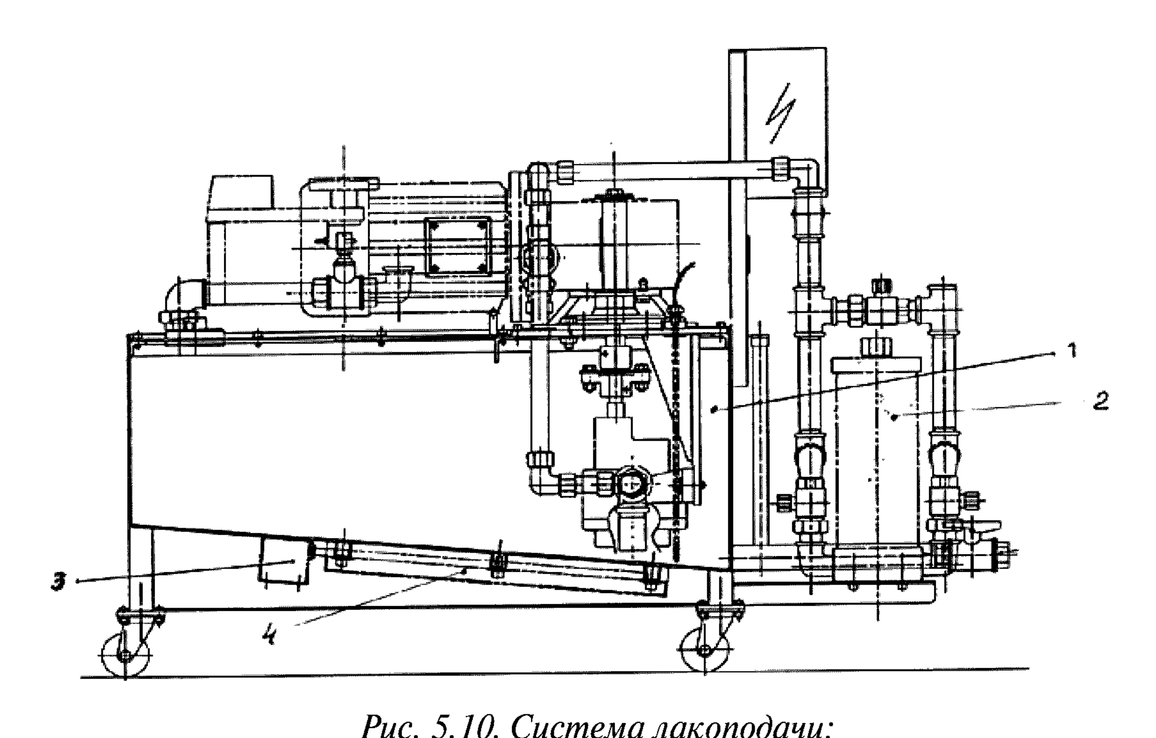


Рис. 5.10. Система лакоподачи:
1 — эмаль-бак; 2 — фильтры; 3, 4 — нагревательная плита и термостат

В современных эмаль-агрегатах (например серии MAG) система лакоподачи включает в себя тот же комплект элементов, который рассмотрен выше, однако лаковая ванна разделена на ряд секций и позволяет производить одно- или двухслойное эмалирование. Эмаль-бак *1* емкостью до 100 л, изготовленный из нержавеющей стали, оснащен насосом, двумя фильтрами, системой подогрева и распределения лака.

Система лакоподачи предусматривает применение лака с дополнительной очисткой (фильтрацией) и без очистки. Для этой цели применяется устройство с тремя клапанами. С помощью двух клапанов лак пропускается через один из фильтров *2*, третий клапан направляет лак, минуя фильтры, непосредственно в лаковую ванну. Давление лака, а соответственно, и скорость ее подачи регулируется вручную специальным устройством.

Чистая, с сухой поверхностью проволока поступает в лаконосящий узел *1* (рис. 5.11). Здесь проволока проходит через лаковые ванночки и покрывается эмаль-лаком. Толщина слоя лака регулируется

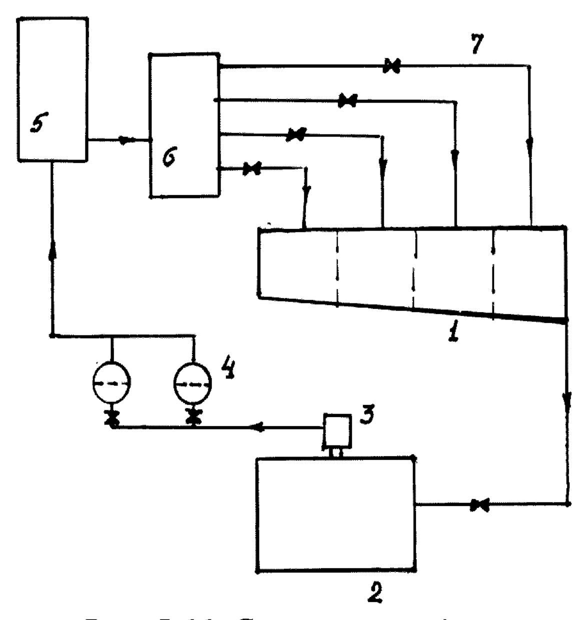


Рис. 5.11. Схема лакоподачи:
1 – эмаль-ванна; 2 – расходный бак;
3 – насос; 4 – фильтры; 5 – термостат;
6 – распределительный бачок

металлическими не разъемными калибрами. Эмаль-лак подается в эмаль-ванны через фильтр, термостат и распределительное устройство. Наличие двух последовательно расположенных лаковых ванн позволяет накладывать два типа эмаль-лака при изготовлении проводов с двухслойной изоляцией. Избыток лака из ванночек стекает через возвратный трубопровод в бак. Конструктивно бак эмаль-лака представлен на рис. 5.10.

5.1.6. Эмаль-печь

Электрическая печь (эмаль-печь) обеспечивает нагрев эмалированных проводов. Внутренняя часть печи выполнена из жаростойкой стали. В средней части печи размещаются электронагреватели. Нагреватели разделяются на две (в некоторых печах на три) группы. Первая группа образует первую тепловую зону, в которой происходит испарение растворителя из эмаль-пленки; вторая группа – вторую зону, где протекает процесс поликонденсации (пленкообразования). Пары растворителя отсасываются из камеры через специальную полость и сгорают в каталитической камере при температуре не ниже 350 °С. Образовавшиеся горячие газы из каталитической камеры вытяжными вентиляторами подаются в камеру печи. Таким образом, нагрев эмаль-печи обеспечивается за счет теплоты, отдаваемой электронагревателями, и теплоты горячих газов. Изменяя величину потоков горячих газов, изменяют величину и распределение температуры по длине камеры печи.

Электрические печи эмаль-агрегатов различных фирм имеют некоторые конструктивные различия: направление потоков горячих газов, система подогрева паров перед каталитическим сжиганием, распределение нагревателей в камере и т. д. Такие линии выполняются с горизонтальными и вертикальными эмаль-печами на различное количество ходов и проходов.

На рис. 5.12 представлена схема вертикальной эмаль-печи агрегата VRE-144 фирмы Сикме. Печь имеет системы подачи подогретого воздуха *16* и подпора в нижней части камеры печи. Воздух, подогретый примерно до 100 °С, равномерно распределяется по сечению печи и исключает проникновение холодного воздуха из помещения в камеру *1.* Пары растворителя с помощью двух вентиляторов *10* отсасываются через полость, расположенную в средней части камеры, подогреваются электронагревателем *6* и поступают на катализатор *17.* Температура паров контролируется, регулируется и не должна быть ниже 350 °С. Горячие газы направляются как в нижнюю, так и верхнюю части камеры. Величина их потоков регулируется частотой вращения вентиляторов и шиберами (заслонками). Поток газов, поступающий в верхнюю часть камеры, почти вдвое превышает поток газов в нижней части. Таким образом, дополнительно повышается температура во второй зоне печи.

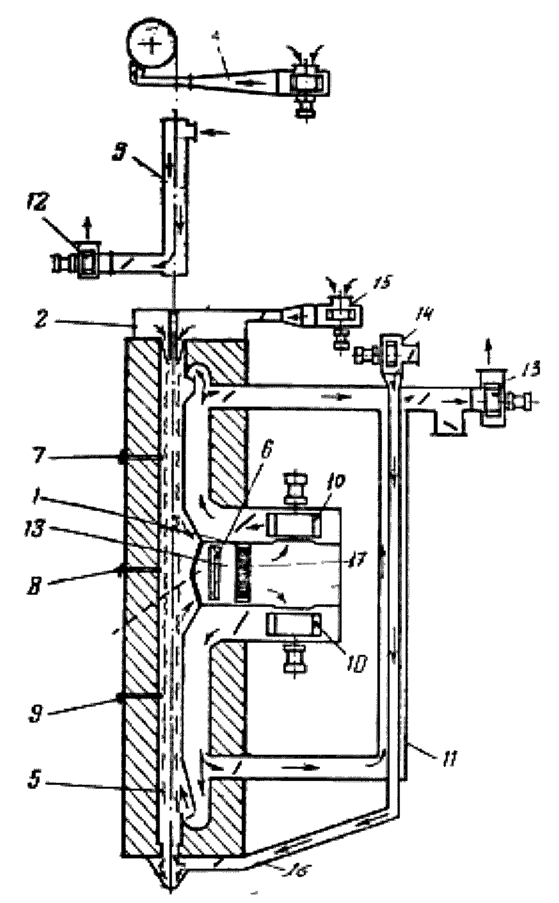


Рис. 5.12. Схема эмаль-печи агрегата VRE-144 фирмы Сикме

В верхней части печи над выходным отверстием располагается устройство подпора *2.* С помощью вентилятора *15* воздух из помещения подается в камеру подпора. Объем воздуха, поступающего в камеру, регулируется шибером так, чтобы не происходила утечка горячих газов через верхнее отверстие и проникновение холодного воздуха в камеру печи.

Над эмаль-печью располагается охлаждающее устройство *3*, имеющее камеру и систему вентиляции. Охлаждение эмаль-провода осуществляется потоком холодного воздуха, засасываемого вентилятором *12* из помещения цеха и регулируемого шибером. Верхние поворотные ролики печи имеют воздушную систему охлаждения *4.*

Тяговое устройство обычно выполняется в виде металлических шкивов с поверхностью, покрытой слоем резины. Для исключения проскальзывания проволоки на тяговых устройствах дополнительно могут применяться прижимные ролики.

Конструкции эмаль-печей в некоторых деталях могут отличаться друг от друга. Так, например, вертикальная эмаль-печь VS 900, с длиной камеры 8000 мм и шириной 900 мм, имеет две части – правую и левую. Правая часть рассчитана на 6 ходов для термообработки проволоки диаметром 0,5...1,4 мм, левая – на 4 хода, при этом три хода – для проволоки диаметром 0,7...2,0 мм и один – для проволоки диаметром 2,0...3,0 мм. Расстояние между проволоками 11 мм. Общая мощность печи 117,25 кВт.

В печи VS 900 предусматривается каталитическое сжигание паров растворителя, циркуляция и рекуперация тепла горячих газов. Принцип работы печи, основные ее элементы и направление потоков представлены на рис. 5.13. По высоте камера печи разделена на две зоны: а) зону испарения растворителя; б) зону поликонденсации (пленкообразования). Первая зона имеет три группы электронагревателей *1–3*, обеспечивающих нагрев провода до заданной температуры и испарение растворителя. Длину этой зоны можно изменять в широких пределах от 15 до 45 % от общей длины камеры (рис. 5.13) в зависимости от типа лака, диаметра провода и необходимой скорости эмалирования. Длина первой зоны регулируется шиберами (заслонками) *4–7*.

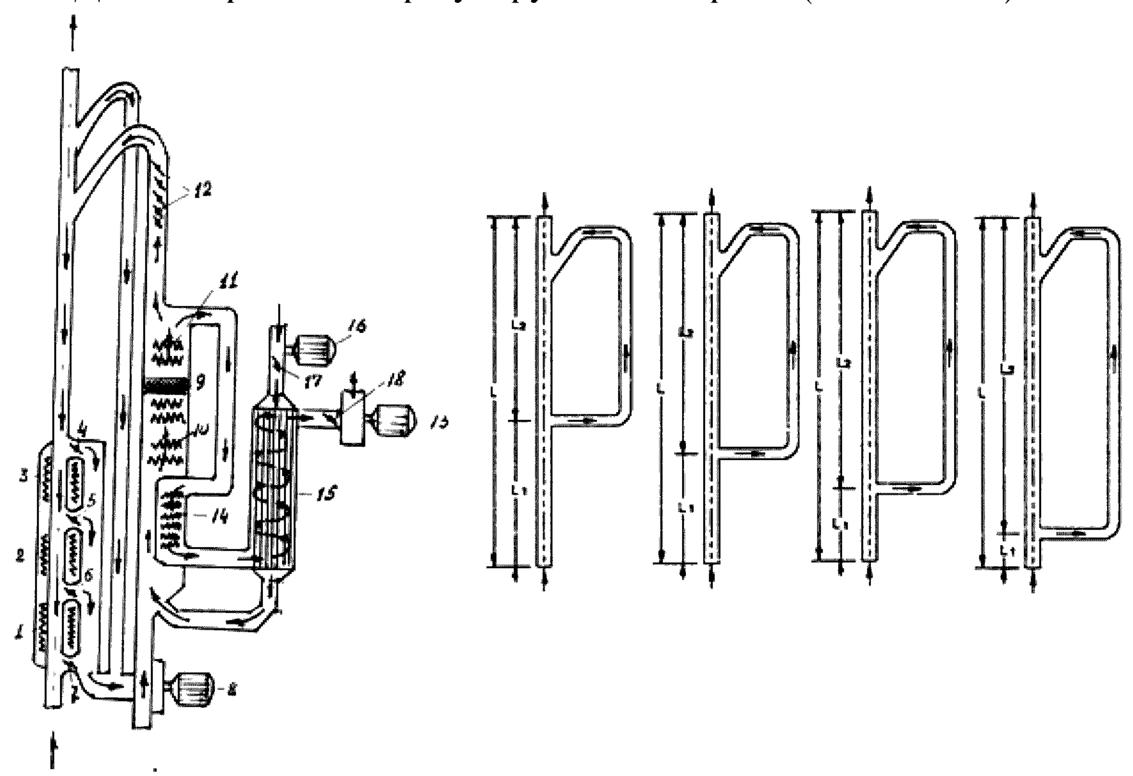


Рис. 5.13. Принципиальная схема эмаль-печи VS-900 и схема изменения длины зоны испарения растворителя в эмаль-печи

Воздух с парами растворителя из первой зоны вытягиваются с основным рециркуляционным вентилятором *5* и направляются к катализатору *9*.

Для более полного и быстрого окисления пары растворителя подогреваются в первой группе электронагревателей *10* до температуры 350 °С. Горячие газы дополнительно нагреваются во второй группе нагревателей *11* до температуры поликонденсации эмаль-пленки, и основной их поток направляется во вторую зону камеры эмаль-печи. Величина и равномерность распределения потока по ширине камеры регулируются шиберами *12*.

Этот поток направлен встречно движению провода со скоростью до 4...6 м/с. Часть объема горячих газов после катализатора и нагревателей отсасывается вентилятором *13*. Она проходит через группу нагревателей *14* и используется для нагрева свежего воздуха, подаваемого затем к катализатору.

Теплообмен между газами и свежим воздухом происходит в теплообменнике *15*. Объем свежего воздуха, поступающего в печь, регулируется при фиксированной скорости вращения вентилятора *16* шибером *17*. Отработанные горячие газы через шибер *18* выбрасываются в атмосферу.

В конструкции печи предусмотрен специальный канал отбора газов, которые выделяются из эмалевой пленки при поликонденсации и двигаются вместе с проводом. Их поток регулируется шибером *18*.

В процессе пуска эмаль-агрегата производится регулировка частоты вращения рециркуляционного вентилятора и величины потоков шиберами *4–7*; *10*; *16*; *18*.

Над печью располагаются камера охлаждения эмалированных проводов и воздушная система охлаждения верхних направляющих роликов.

На рис. 5.14 приведена схема нагрева провода в горизонтальной эмаль-печи HN-4. Провод проходит без перегибов вдоль оси калибра и поступает в камеру эмаль-печи. В первой зоне камеры температура должна быть не выше температуры кипения чистого растворителя лака. Смесь паров растворителя с воздухом циркуляционным вентилятором подается через первую группу электронагревателей в катализатор, где происходит окисление паров. Температура образовавшихся горячих газов зависит от концентрации растворителя. После катализатора часть потока горячих газов направляется встречно движению проволоки в первую зону печи, другая часть газов подогревается второй группой

электронагревателей и с более высокой температурой подается во вторую зону камеры печи, где происходит непрерывная циркуляция нагретого воздуха.

Современные печи оснащены системой отсоса паров растворителя и газов, образующихся во второй зоне. Эта смесь подается на катализатор, где сжигается при $t = 350$ °С. Горячие газы определенных объемов с помощью вентилятора подаются в реторту печи. Таким образом, с помощью электронагревателей и потоков газов в камере в каждой зоне должна поддерживаться температура в соответствии с вышеизложенными теоретическими предложениями.

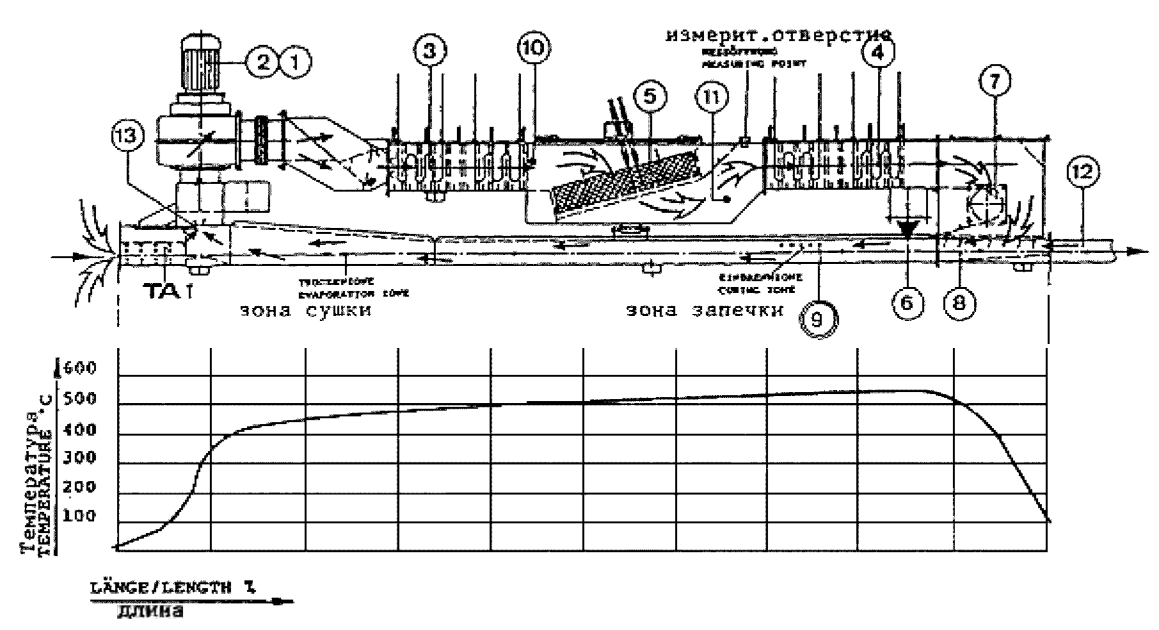


Рис. 5.14. Эмаль-печь и температура в камере печи эмаль-агрегата NH-4. Заданная температура t = 525 °С, обороты циркуляционного вентилятора – 2500 об/мин, обороты вытяжного вентилятора печи отжига – 2500 об/мин, обороты вытяжного вентилятора – 1400 об/мин:
1 – вентилятор байпаса печи отжига; 2 – циркуляционный вентилятор эмаль-печи; 3 – регулируемый нагреватель до катализатора; 4 – регулируемый нагреватель за катализатором; 5 – катализатор; 6 – отсос циркуляционного воздуха печи отжига; 7 – отсос отработанного воздуха печи отжига; 8 – зона смешивания; 9 – регулировочный термоэлемент EBZ; 10 – термоэлемент до катализатора; 11 – термоэлемент за катализатором; 12 – теплообменник; 13 – регулировочная заслонка; 14 – каналы реторты

В конце первой зоны температура лака должна соответствовать температуре кипения чистого растворителя ($t_{кр}$). Во второй зоне температура должна обеспечить полную реализацию процессов поликонденсации в эмалевой плёнке. В зависимости от типа плёнкообразующего эмаль-лака температура плёнкообразования ($t_{по}$) выше критической на 100...200 °С.

Эмаль-агрегат NH-4 имеет вентилятор для охлаждения поверхности направляющих роликов на выходе из охлаждающей камеры эмаль-печи. Готовый эмалированный провод после прохода через парафиновый узел поступает на приемное устройство, которое состоит из приемного ролика, тяговой шайбы, контрольного ролика, прижимного ролика, компенсатора, раскладчика, регулируемого привода и т. д.

Эмаль-агрегат HN-4 может эксплуатироваться при определенных условиях среды. Так, температура помещения может колебаться в интервале 22...35°C при относительной влажности до 70 %.

HN-4 может работать в следующих режимах:

- наложение одного вида эмаль-лака на все восемь проволок одного диаметра с одной скоростью эмалирования;
- наложение одного вида эмаль-лака на все проволоки разного диаметра с разной скоростью;
- наложение двух видов лака на все проволоки одного диаметра с одинаковой скоростью эмалирования;
- наложение двух видов лака на проволоки разных диаметров с разной скоростью эмалирования.

Медная заготовка (проволока) с отдающего устройства проходит через волочильную приставку T/KE-4/1-9Z26, печь отжига и после охлаждения и очистки проходит в лаковую ванну и поступает в эмаль-печь. Готовый эмалированный провод наматывается на приемные катушки, которые располагаются на приемном устройстве, совмещенном с волочильной приставкой.

5.1.7. Волочильная приставка

В последние годы в производстве эмалируемых проводов принято направление совмещения процессов волочения и эмалирования. Ряд зарубежных фирм (MAG, Sikme и др.) разработали линии, на которых объединены волочильное оборудование и эмаль-агрегаты. О целесообразности совмещения таких операций говорят следующие моменты:

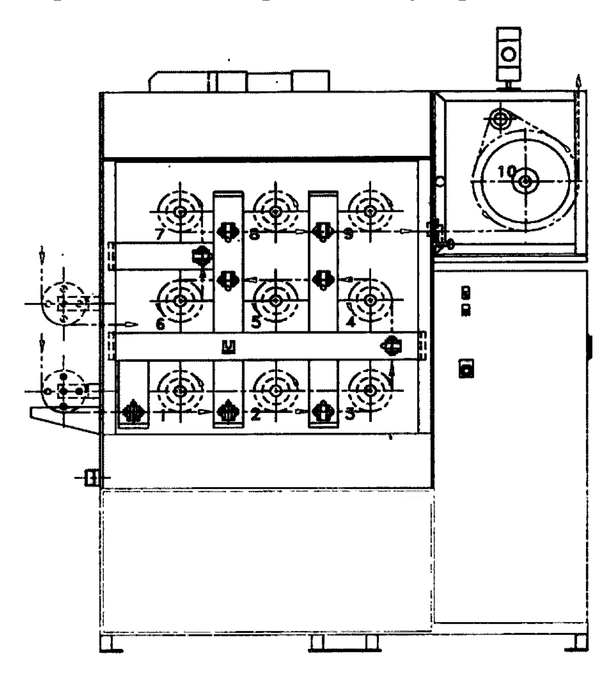
1. Используются малогабаритные волочильные машины (приставки).
2. Уменьшается объем промежуточных складов (площадок).
3. Имеется возможность использования отдающих барабанов повышенной емкости (100...400 кг), так как из проволоки одного и того же диаметра изготавливаются провода различных размеров.
4. Замена отдающих барабанов происходит 1–2 раза за смену.

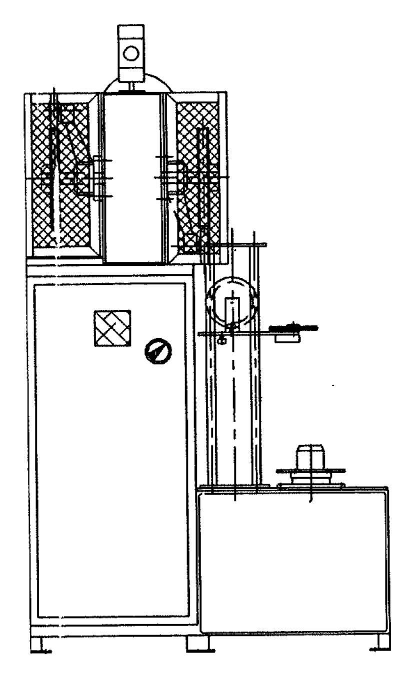
5. Сварка концов проволоки с двух барабанов производится без остановки линии. Благодаря большому диаметру проволоки качество сварки повышается.
6. Уменьшается количество обрывов проволоки.
7. Из-за непрерывности работы количество брака снижается.
8. Эмалирование проволоки ведется в одном направлении с волочением, т. е. по «ворсу».
9. Снижается количество обслуживающего персонала и т. д.

Совмещение волочения с эмалированием позволило повысить качество эмаль-проводов, в частности относительное удлинение на 15 %, разрывную прочность – на 25 %, на 10 % снизилась упругость, а также количество точечных повреждений изоляции.

Волочение проволоки реализуется на волочильных машинах (приставках) TSM 15/10, TSM 15/4 или T/KE-4/1–9Z26.

Конструктивно волочильные приставки совмещены с приёмным устройством. Общий вид волочильной приставки TSM 15/10 показан на рис. 5.15, а приемное устройство – на рис. 5.16.





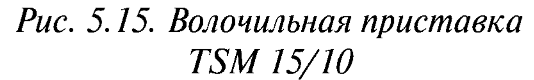


Рис. 5.15. Волочильная приставка TSM 15/10

Рис. 5.16. Приёмное устройство TSM 15/10

Машина типа TSM 15/10 обеспечивает волочение со скольжением проволоки с диаметром 0,7...2 мм и 0,5...1,4 мм из заготовки диаметром 2,5 мм. Машина имеет 9 цилиндрических тяговых шайб диаметром 150 мм, которые располагаются внутри корпуса машины, десятая шайба диаметром 350 мм закреплена вне машины.

Поверхность шайб покрыта слоем карбида вольфрама. К волокам, закрепленным в волокодержателях, и тяговым шайбам под давлением подается смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). При волочении в промежуточных волоках средняя величина обжатия принимается равной 19 % (относительное удлинение 23,5 %), в последней волоке – до 19,5 %. Машина имеет приводной электродвигатель постоянного тока, от которого вращательное движение передается шайбам с помощью зубчатых ремней. На входе в приставку установлено устройство, автоматически останавливающее машину при обрыве проволоки. Волочильная приставка совмещена с приемным и тяговыми устройствами. Тяговая шайба диаметром 353 мм приводится в движение с помощью зубчатого ремня от приводного двигателя волочильной машины. Приемное устройство (рис. 5.16) рассчитано на установку двух цилиндрических или конических катушек. Узлы приемного устройства расположены в вертикальной плоскости и имеют приводной двигатель, обеспечивающий постоянное натяжение провода. Раскладка провода на катушке ведется раскладывающим устройством, движение которого задается винтом и приводным двигателем с регулируемой скоростью для коррекции шага намотки.

Таблица 5.2

Перечень эмаль-агрегатов фирмы MAG

Тип агрегата	Диаметр проволоки, мм	Скорость эмалирования, м/мин	Длина эмаль-печи, м	Производительность на 1 линию, кг/сут	*Vd*, м·мм/мин	Примечание, кВт·ч/кг
MOZART H3/2-(2/24) MOZART H3/4-(4/24) MOZART H3/6-(6/24) MOZART H3/1-(2/48) MOZART H3/2-(4/48) MOZART H3/3-(6/48)	0,15...0,35	500...1250	7,6	285...625	170	3...1,3
MOZART H4/2-(2/12) MOZART H4/4-(4/24) MOZART H4/1-(2/24+24) MOZART H4/2-(4/24+24)	0,2...0,5	0...1210	8,6	460...1065	200	1.3...0,7

Тип агрегата	Диаметр проволоки, мм	Скорость эмалирования, м/мин	Длина эмальпечи, м	Производительность на 1 линию, кг/сут	*Vd*, м·мм/мин	Примечание, кВт·ч/кг
MOZART H5/2-(2/24) MOZART H5/4-(4/24) MOZART H5/6-(6/24) MOZART H5/2-(4/48) MOZART H5/3-(6/48)	0,3...0,8	250...800	8,6	675...1540	200	1,3...0,6
MOZARTV7 MOZARTV7/2-2/17D MOZARTV7/4-4/17D	1,0...4,0	140...12	10	1460...2000	140...50	1,0
VZF 8/1-1/14 D	2,0...5,2		10,1			
STRAUSS H4, H5 H4/4-2/14D H5/2-2/28D	0,2...0,5 0,3...0,8	900...350 600...200	8,6 8,6	383...885 557...1287	180 180...170	1,2...06 1...0,4
HESF1/1-0F	0,05...0,12	500...1300	2,8	40...90	60	8...4
HESF2 HESF2/2-2/35F HESF2/4-2/35F HESF2/2-3/3	0,08...0,15 фетр. калибр	800...1400	5,8	95...205	100	3,5...1,7
HESF3/2 2HESF3/4 HESF3/2	0,2...0,25	400...1300	6,4	150...300	110	5...2,5

Общий вид волочильной приставки T/KE-4/1–9Z26 показан на рис. 5.17. Заготовка (подтяжка 1) диаметром 0,71 или 1,4 мм с отдающего устройства по входному направляющему ролику *2* поступает в левую часть приставки, где располагаются две четырехступенчатые шайбы *3*. Между шайбами расположены волокодержатели *6* со встроенными форсунками для распыления эмульсии, т. е. смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

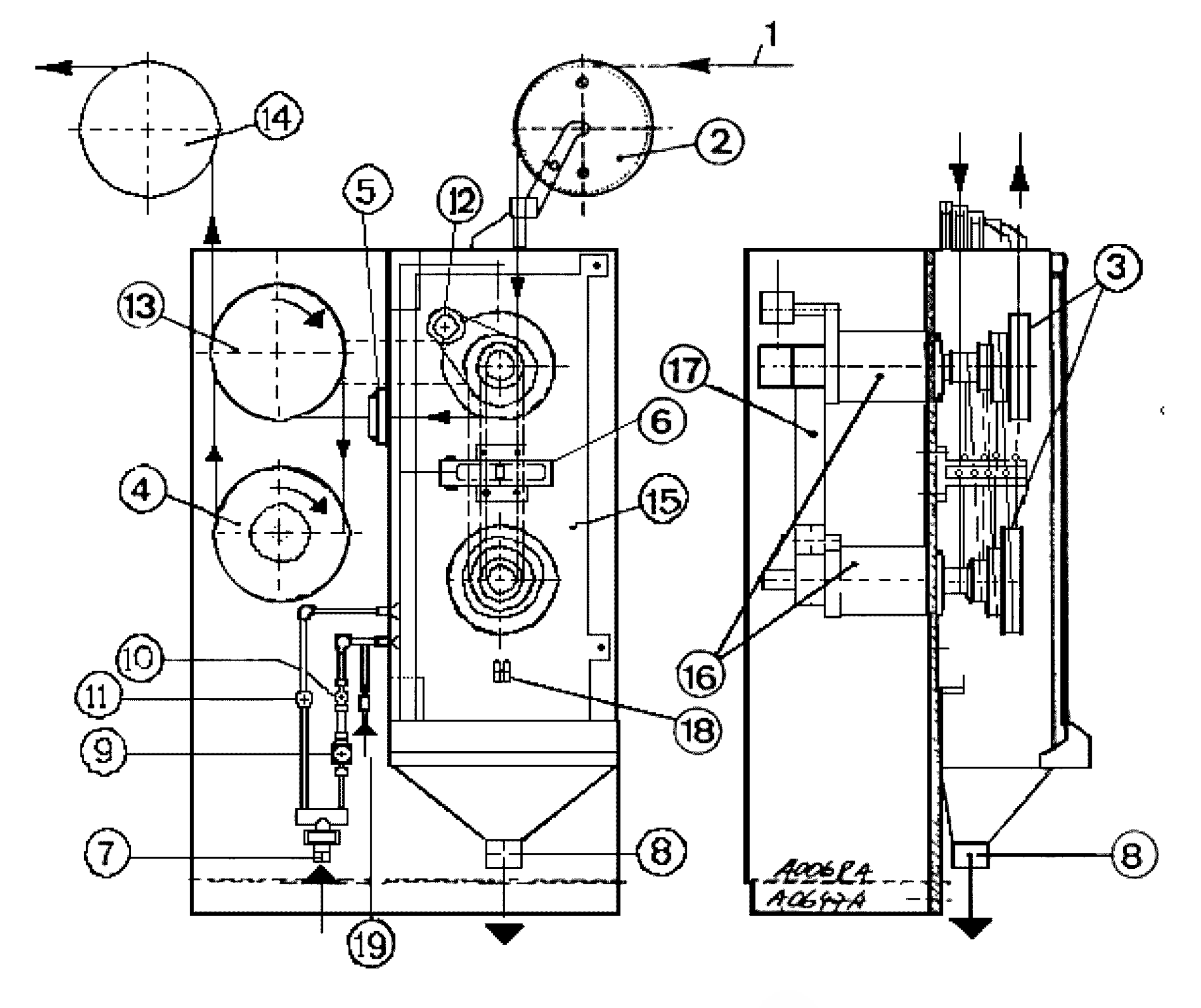


Рис. 5.17. Волочильная приставка T/KE-4/1-9Z26:

1 – заготовка; 2 – направляющий ролик заготовки; 3 – четырехступенчатые тяговые шайбы; 4 – прижимной ролик; 5 – держатель конечной волоки; 6 – волокодержатели; 7 – трубка подачи эмульсии; 8 – трубка отвода эмульсии; 9 – запорный вентиль эмульсии; 10 – регулировочный вентиль впрыска эмульсии к волокам; 11 – регулировочный вентиль впрыска эмульсии к тяговым шайбам при заправке проволоки; 12 – форсунка для конечной волоки; 13 – конечная тяговая шайба; 14 – направляющий ролик готовой проволоки; 15 – корпус волочильной приставки; 16 – подшипники осей тяговых шайб; 17 – зубчатый ремень; 18 – держатель фильеры для заправки проволоки; 19 – подключение фланца сжатого воздуха подачи эмульсии

5.2. Расчет технологических режимов эмалирования проводов

5.2.1. Расчет скорости эмалирования по эмпирической формуле ВНИИКП

Скорость эмалирования определяется временем протекания физико-химических процессов в эмалевой пленке при термообработке провода и длиной печи.

При термообработке последовательно и непрерывно в эмалевой пленке происходит испарение растворителя и пленкообразование.

$$\tau_1 = \tau_{\text{ир}} + \tau_{\text{пл}}, \tag{5.3}$$

где $\tau_{\text{ир}}$ – испарение растворителя; $\tau_{\text{пл}}$ – время пленкообразования.

По данным некоторых фирм,

$$\tau \equiv \delta^2,$$

где δ – диаметральная толщина изоляции, накладываемой за проход.

В работах ВНИИКП предложена эмпирическая зависимость

$$\tau = A\delta^b, \tag{5.4}$$

где A, b – коэффициенты, характеризующие металл жилы и тип лака; δ – диаметральная толщина изоляции за 1 проход, мкм.

Для медного эмаль-провода, эмалированного лаком ВЛ-931, $A = 0{,}0026$, $b = 2{,}1$; для алюминиевого провода $A = 0{,}0019$, а для медной проволоки и ПЭ-939 $A = 0{,}0031$.

Если длина камеры эмаль-печи H (м), то в этом случае скорость эмалирования определяется формулой

$$\upsilon_{\text{эм}} = H / \tau = \frac{H}{A}\delta^{-b}. \tag{5.5}$$

Принимая, что $\delta = \Delta_{из}/i$, получаем:

$$\upsilon_{\text{эм}} = \left(\frac{H}{A}\right)\left(\frac{i}{\Delta_{из}}\right)^{2,1} = \frac{H}{A} i^{2,1}\Delta_{из}^{-2,1}, \text{ м/мин.} \tag{5.6}$$

5.2.2. Расчет скорости эмалирования по времени испарения растворителя

Из (5.6) следует, что скорость эмалирования увеличивается с ростом i. И этим можно объяснить увеличение i до 16...24 на современных эмаль-агрегатах.

Предельная скорость эмалирования υ определяется скоростью нагревания провода в печи, скоростью испарения растворителя и пленкообразования.

Испарение происходит с поверхности эмалевого покрытия при непрерывной диффузии растворителя из внутренних слоев. Согласно закону Фика

$$D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}=\frac{\partial C}{\partial \tau}, \quad (5.7)$$

где D – коэффициент диффузии, м²/с; C – концентрация растворителя; τ – текущее время, с.

$$D = f(T) \text{ и равен } D = D_0\exp(-E/kT) \quad (5.8)$$

и тогда

$$D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}=\frac{\partial C}{\partial \tau}\exp\left(-\frac{E}{kT}\right). \quad (5.9)$$

В связи с тем, что толщина покрытия и коэффициент диффузии во время термообработки изменяются, то уравнение (5.9) чисто аналитически не решается. Поэтому вводится ряд коэффициентов, определяемых экспериментально:

$$D_0\exp(-E/kT) = D_a e^{\alpha\theta}, \quad (5.10)$$

где D_a, α – коэффициенты, определяемые для каждого лака.

Примерные значения этих коэффициентов для полиэфирных лаков:

$$D_a = 0{,}315\cdot 10^{-12}\text{ м}^2/\text{с},\ a = 0{,}02...0{,}04\ 1/\text{град},\ a_{\text{ср}} = 0{,}0307\ ^\circ\text{C}^{-1},$$

где θ – температура провода °С.

Температура и характер нагрева пленки лака на проводе имеют очень важное значение. Режим нагревания должен быть таким, чтобы в пленке не возникали газовые включения. Эксперименты показали, что при начальной концентрации растворителя C_0 пленку необходимо быстро нагреть до $\theta_{\text{кр}}$ и выдержать ее при этой температуре до момента, когда

$$C \to C_{\text{кр}} = 0{,}2C_0.$$

После чего образование газовых включений исключается.

С учетом вышеизложенного

$$C_{\text{кр}} = \frac{4}{\pi} C_0 \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{D_a}{\delta^2} \int_0^{\tau_{кр}} \exp(a\theta_{\text{н}}) d\tau \right), \tag{5.11}$$

где $\theta_{\text{н}}$ – начальная температура провода при входе в печь, °С.

Отсюда время испарения растворителя, т. е. изменение C от C_0 до $C_{\text{кр}}$, называется $\tau_{\text{кр}}$ и определяется как

$$\tau_{\text{кр}} = \ln\left(1 - \frac{\delta^2 ab}{\pi^2 D_a e^{a\theta}} \ln \frac{\pi C_k}{4C_0} \right) \frac{1}{ab}, \text{ с}, \tag{5.12}$$

где b – скорость нагрева провода в первой зоне, °С/с; δ – толщина слоя лака, наносимого за один проход.

В таком случае скорость эмалирования определяется процессом испарения растворителя

$$\upsilon_{\text{эм}} = \frac{h_{\text{кр}}}{\tau_{\text{кр}}}, \text{ м/с}, \tag{5.13}$$

где H – длина камеры печи, м; $h_{\text{кр}}$ – длина зоны испарения растворителя, т. е. зоны I.

Обычно

$$h_{\text{кр}}/H = 0{,}3 - 0{,}5 \approx 0{,}5. \tag{5.14}$$

$$\upsilon_{\text{э}} = \left(\frac{0{,}3 + 0{,}5}{2} \right) H \frac{ab}{\ln\left(1 - \frac{\delta^2 ab}{\pi^2 D_a e^{a\theta}} \ln \frac{\pi C_k}{4C_0} \right)}, \text{ м/с}. \tag{5.15}$$

Скорости, достигаемые на современном оборудовании, указаны в табл. 5.3

Таблица 5.3

Скорости эмалирования на эмаль-агрегатах

$d_{\text{пр}}$, мм	Венгрия, м/мин	Sicme (Италия), м/мин	MAG, м/мин
0,02...0,05	до 600	до 1000	до 1500
0,05...0,15	30...300	до 650	от 1500 до 1000
0,1...0,3	30...300	до 650	1000...250
0,5...1,6	до 50	до 50	140...40
1,6...3,2	до 30	до 30	30...10
10...50 мм^2	–	1,6	2,7...15

5.2.3. Расчет скорости эмалирования по техническим данным эмаль-агрегатов

Современные эмаль-агрегаты позволяют устанавливать и поддерживать оптимальное распределение температуры воздуха по длине эмаль-печи. Пользуясь расчетными и экспериментальным данными технологических режимов эмалирования, фирмы-изготовители эмаль-станков дают рекомендации по выбору скорости эмалирования для наиболее широко применяемых лаков (ПУ – полиуретановые эмаль-лаки, ПЭ – полиэфирные, ПЭИ – полиэфиримидные, ПАИ – полиамидимидные). Поскольку оптимальные температуры структурирования этих лаков несколько отличаются друг от друга, то характерные зависимости, приведенные на рис. 5.26, имеют некоторый разброс значений (доверительный интервал) в пределах которого можно определить скорость эмалирования для заданного диаметра проволоки по зависимостям $Vd = \varphi(d)$ или $V = \varphi(d)$, где V – скорость эмалировния (м/мин), d – диаметр проволоки (мм). Так, например, согласно рис. 5.18 для проволоки диаметром 0,8 мм оптимальная скорость эмалирования, рассчитанная по кривой $V = \varphi(d)$, составляет 125 м/мин. Аналогичный результат получается и при расчете скорости эмалирования по кривой $Vd = \varphi(d)$.

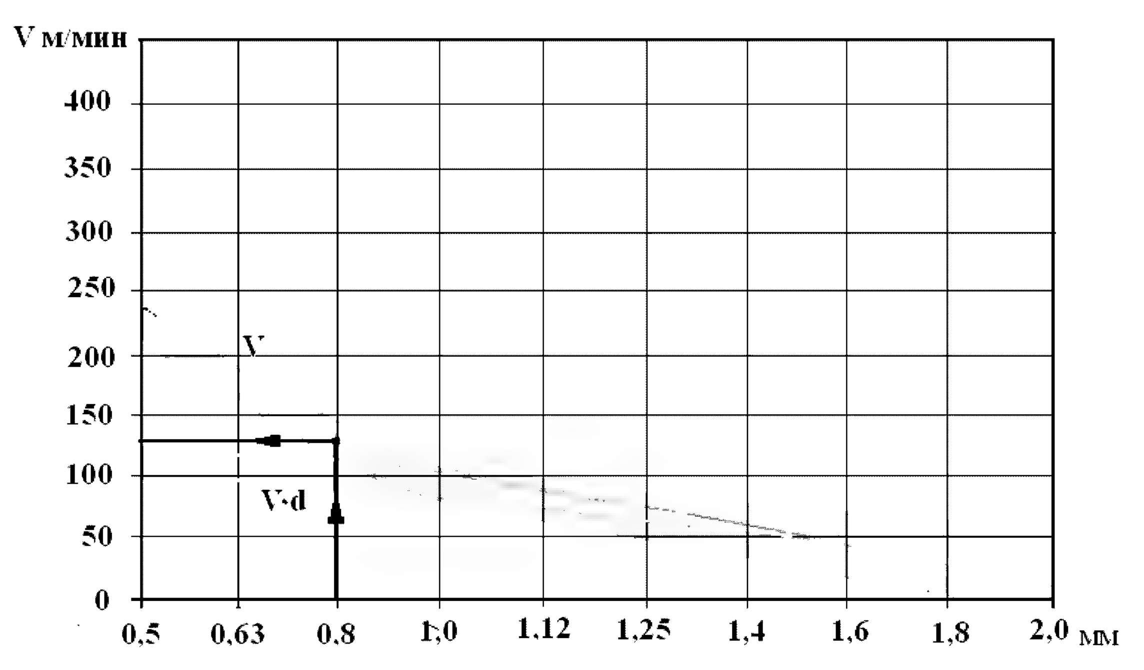


Рис. 5.18. Зависимость скорости эмалирования V и параметра эмалирования Vd от диаметра проволоки

5.3. Расчет маршрута калибров для эмалирования проволоки

В настоящее время при эмалировании проволоки диаметром 0,1 мм и более применяют калибровый способ нанесения лака, позволяющий регулировать толщину наносимого покрытия на каждом проходе и, соответственно, время испарения растворителя. В слоях лака одинаковой толщины условия полимеризации и поликонденсации смолы будут неизменными по всем проходам и, следовательно, многослойная изоляция эмалированного провода будет более однородной и стабильной по своим электрическим и физико-механическим свойствам. Но, как показывает практика, на отечественных заводах этому вопросу уделяется мало внимания. Единственная общепринятая методика расчета калибров, приведенная в работах И.Б. Пешкова [1, 43], является достаточно трудоемкой и почти нигде не используется технологами. Подбор калибров производится практически интуитивно, исходя из опыта работы эмалировщиков с различными лаками и проводами различных диаметров, либо используются рекомендации фирм-производителей эмаль-агрегатов. Не касаясь вопросов выбора температурного и скоростного режимов эмалирования, можно считать, что процессы структурирования лаковой пленки, ее толщина и степень завершенности химической реакции по каждому слою лака никак не контролируются и не определяются. Поэтому говорить о способах повышения качества изоляции эмалированных проводов нет особого смысла, так как нет достаточно четких и определенных критериев к условиям формирования лаковой пленки, нет методов определения ее реальной толщины и, следовательно, возможности управлять ею в процессе производства эмалированных проводов.

Понятно, что наиболее высокие электроизоляционные свойства эмалированного провода могут быть реализованы только в том случае, если каждая ступень технологического процесса будет максимально приближена к оптимальной, в том числе и выбор маршрута калибров лаконаносящего устройства.

В основу предлагаемого метода расчета калибров положены физико-химические процессы, происходящие в наносимом слое лака, начиная с момента его формирования в калибре и до выхода из эмаль-печи. Данная методика разработана на кафедре электроизоляционной и кабельной техники Томского политехнического университета [38,39].

5.3.1. Расчет диаметра калибров

При расчете маршрута калибров были приняты следующие обозначения: d_0 – диаметр проволоки; d_1, d_2, d_n – диаметры калибров по соответствующим проходам; n – количество проходов; δ_T – диаметральная толщина слоя твердой эмали, наносимой за один проход; δ_0 – диаметральный зазор между проволокой и калибром; $\delta_ж$ – диаметральная толщина слоя жидкого лака, наносимого за один проход; $\Delta_ж$ – суммарная диаметральная толщина наносимого слоя жидкого лака; Δ_T – диаметральная толщина изоляции эмалированного провода.

В настоящее время на эмаль-агрегатах используют оптимальную форму конических калибров с цилиндрической формующей вставкой на выходе из калибра, что обусловливает ламинарное течение лака в зазоре с постоянной величиной градиента скорости. В таком зазоре среднее значение скорости течения жидкости будет в два раза меньше скорости движения провода. Следовательно, радиальная толщина наносимой за один проход жидкой эмали будет равна половине радиального зазора формующей части калибра. В работе [42] аналогичный результат приведен как частный (граничный) случай для конического калибра, когда его входной и выходной радиусы одинаковы. С учетом сказанного для оптимальных калибров можно записать $\delta_0 = 2\delta_ж$.

Исходя из общих требований к выбору маршрута эмалирования для проводов, которые изготовляются с применением оптимальных калибров, диаметр первого калибра d_{1k} должен быть больше диаметра провода на величину δ_0 (диаметральный зазор между проволокой и калибром):

$$d_{1k} = d_0 + \delta_0. \qquad (5.16)$$

Толщина слоя лака, наносимого за один проход, определяется числом проходов проволоки через ванну с лаком и величиной сухого остатка [43]. Диаметр следующего калибра $d_{2К}$ определяется величиной сухого остатка лака и может быть рассчитан как

$$d_{2k} = d_0 + \delta_T + \delta_0.$$

При числе проходов эмалирования диаметр промежуточного i-го калибра

$$d_{ik} = d_0 + \delta_0 + (i-1)\delta_T. \qquad (5.17)$$

Если маршрут калибров подбирается таким образом, чтобы δ_0 = const по всем проходам, тогда постоянной будет и толщина слоя эмали δ_T = const, наносимая на каждом проходе. В этом случае последнее уравнение принимает вид

$$d_{ik} = d_0 + \delta_0 + (i-1)\delta_T = d_0 + \frac{\delta_T}{P_{об}} + (i-1)\delta_T \,. \quad (5.18)$$

Для последнего прохода, когда $i = n$

$$d_{nk} = d_0 + \delta_0 + (n-1)\delta_0 P_{об} = d_0 + 2\delta_{ж} + (n-1)2\delta_{ж} P_{об}, \quad (5.19)$$

где $\delta_{ж}$ – диаметральная толщина лака, наносимая за один проход.

Как следует из последних уравнений, для расчета диаметров калибров необходимо знать величину сухого остатка.

При переходе лака из жидкого состояния в твердое существенно уменьшается его объем. Величину сухого остатка P определяют по ТУ 16 К71–074–90, кроме того, она приводится в технической документации каждого лака. Значение P берется в относительных единицах и принято считать, что оно численно равно отношению толщины твердой эмалевой пленки провода к толщине нанесенного слоя лака: $P = \delta_T/\delta_{ж}$.

Однако абсолютное значение сухого остатка, приводимое в ТД, является завышенным, так как оно определяется путем запечки лака при $T = 200$ °С в течение 45 минут. При этих условиях реакция поликонденсации не успевает пройти до конца и степень завершенности химической реакции будет незначительна, существенно ниже, чем в реальном технологическом процессе. Для большинства лаков величина сухого остатка, согласно технической документации, составляет 10–35 %.

Дополнительно к этому параметр P включает следующие факторы, приводящие к уменьшению толщины эмалевого покрытия провода в процессе нанесения лака и его запечки:

- p_1 – вытяжка лаковой пленки на выходе из калибра (50 %).
- p_2 – вытяжка провода в процессе эмалирования (1–3 %).
- p_3 – унос низкомолекулярных фракций лака в процессе его запечки в эмаль-печи (5–10 %).

Поскольку экспериментальное определение каждого из этих параметров представляет определенные трудности и связано с отработкой методики эксперимента, приближенное значение обобщенного параметра $P_{об}$ можно рассчитать для каждого лака исходя из практического опыта эмалирования и установленных на данном эмаль-агрегате размерах калибров.

5.3.2. Расчет обобщенного параметра $P_{об}$

В зависимости от числа проходов суммарная диаметральная толщина наносимого слоя жидкого лака $\Delta_ж$ может быть рассчитана по урав-нению

$$2\Delta_{ж} = (d_1 - d_0) + (d_2 - d_0 - \delta_T) + (d_3 - d_0 - 2\delta_T) + ... +$$
$$+[d_n - d_0 - (n-1)\delta_T] = \sum(d_i - d_0) - \frac{n(n-1)\delta_T}{2}, \quad (5.20)$$

из которого следует, что на последнем проходе наносится толщина слоя жидкого лака

$$2\delta_{ж} = \delta_0 = d_n - d_0 - (n-1)\delta_T. \quad (5.21)$$

Такой же будет эта величина и на любом другом проходе, если диаметры калибров рассчитаны согласно уравнениям (5.18) и (5.19).

Если калибры подобраны экспериментальным путем, исходя из предыдущего опыта работы, тогда обобщенную величину сухого остатка $P_{об}$ можно рассчитать по сумме всех проходов:

$$P_{об} = \frac{\Delta_T}{2\Delta_{ж}} = \frac{\Delta_T}{\sum(d_i - d_0) - \frac{(n-1)\Delta_T}{2}}. \quad (5.22)$$

Если маршрут калибров был ранее рассчитан по данной методике, тогда обобщенное значение сухого остатка можно вычислить по уравнению:

$$P_{об} = \frac{\delta_T}{2\delta_{ж}} = \frac{\delta_T}{d_n - d_0 - (n-1)\delta_T} = \frac{\Delta_T}{n(d_n - d_0) - \Delta_T\,(n-1)}. \quad (5.23)$$

Расчет величины $P_{об}$ по уравнению (5.23) менее трудоемок, так как слои нанесенного лака по каждому проходу одинаковы и знак суммы можно заменить произведением $n\,(d_n - d_0)$.

Приближенное значение обобщенного параметра $P_{об}$ численно равно величине сухого остатка лака, находящегося в слое $\delta_ж$ и распределенного в объеме вдвое большем, чем обусловленном зазором δ_0. Его величина может быть найдена так же через фактическое значение сухого остатка для каждого лака:

$$P_{об} = p_1 p - p_2 - p_3.$$

В работе [40] для лака ПЭ-943 рассчитанное значение $P_{об} = 0{,}106$. Если задать значения параметров $p_1 = 0{,}5$, $p_2 = 0{,}01$ и $p_3 = 0{,}06$, тогда найденное фактическое значение величины сухого остатка для этого лака составит:

$$p = \frac{p_{об} + p_2 + p_3}{0,5} = \frac{0,106 + 0,01 + 0,06}{0,5} = 0,35,$$

что хорошо согласуется с величиной сухого остатка этого лака $P = 0,32...0,36$.

Значение сухого остатка P можно найти из отношения $P = \Delta_T/2\Delta_ж$, где Δ_T – фактическая диаметральная толщина эмалевой изоляции; $\Delta_ж$ – расчетное значение суммарной диаметральной толщины лака, нанесенного по всем проходам (уравнение (5.20)).

Уравнения (5.18) и (5.19) позволяют по установленному на эмальагрегате маршруту калибров рассчитать $\delta_ж$ и δ_T по каждому из проходов, если известнен сухой остаток лака P. Такой расчет показывает, что при существующей на заводах практике подбора калибров толщина наносимого слоя лака постоянно увеличивается от первого прохода к последнему от 1,5 до 3 раз. Это означает, что внешние слои лака только по этой причине имеют меньшую степень запечки. А если учитывать то, что они еще и меньшее число раз проходят через печь, можно сделать вывод – толщины нанесенных на провод слоев лака далеки от оптимальных.

Поскольку величина сухого остатка лака $P_{об} = \text{const}$, используя уравнение (5.23) можно установить связь между числом проходов n и толщиной твердой эмали, наносимой за один проход.

Предположим, что число проходов увеличили от n_1 до n_2 при неизменной толщине эмали Δ_T, тогда можно записать

$$P_{об} = \frac{\Delta_T}{2\Delta_ж} = \frac{\Delta_T}{\sum(d_i - d_0) - \frac{(n_1 - 1)\Delta_T}{2}} = \frac{\Delta_T}{\sum(d_i - d_0) - \frac{(n_2 - 1)\Delta_T}{2}};$$

$$\sum(d_i - d_0) - \frac{(n_1 - 1)\Delta_T}{2} = \sum(d_i - d_0) - \frac{(n_2 - 1)\Delta_T}{2}. \tag{5.24}$$

Принимая во внимание, что Δ_T и $\delta_ж$ изменяются обратно пропорционально числу проходов, можно записать, что

$$n_1\delta_{1ж} = n_2\delta_{2ж} = \Delta_ж = \text{const}.$$

При постоянном шаге калибров $h = d_{i+1} - d_i = \text{const}$ решением уравнения (5.24) является равенство

$$nh = \Delta_T \quad \text{или} \quad h = \delta_T. \tag{5.25}$$

Таким образом, *толщина эмалевой пленки, наносимой за один проход, равна шагу калибров.*

В качестве примера рассмотрим расчет маршрута калибров для эмалирования проволоки диаметром d_0 = 0,8 мм при числе проходов

n = 12. Диаметральная толщина нанесенной на провод изоляции Δ_T должна составлять 65 мкм. Обобщенное значение сухого остатка лака $P_{об} = 0,106$.

Полагая, что толщина слоя лака должна быть примерно одинакова по всем проходам, рассчитаем среднее значение диаметральной толщины эмали δ_T, наносимой на каждом проходе:

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{n} = \frac{0,065 \text{ мм}}{12} = 0,0054 \text{ мм}.$$

После этого рассчитаем диаметральную толщину лака, наносимого на каждом проходе через калибр:

$$\delta_{ж} = \frac{\Delta_T}{2P} = \frac{0,0054 \text{ мм}}{2 \cdot 0,106} = 0,0255 \text{ мм}.$$

Далее по уравнению (5.19) вычислим диаметры калибров d_k по всем проходам. Расчетные значения d_k приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Расчетные размеры калибров, провода ПЭТВ-2
(лак ПЭ-943, d_0 = 0,80 мм, Δ_T = 0,065 мм, n = 12, $P_{об}$ = 0,106)

№ прохода	d_k, мм	$d_{k\ среднее}$, мм	$\delta_{ж}$, мм	Δ_T, мм
1	0,851	0,85	0,025	0,0053
2	0,856	0,86	0,027	0,011
3	0,862	0,86	0,025	0,016
4	0,867	0,87	0,027	0,022
5	0,873	0,87	0,024	0,027
6	0,878	0,88	0,026	0,033
7	0,883	0,88	0,024	0,038
8	0,889	0,89	0,026	0,043
9	0,894	0,89	0,023	0,048
10	0,899	0,90	0,026	0,054
11	0,905	0,91	0,028	0,06
12	0,910	0,91	0,025	0,065

В заводской практике не всегда удается подобрать размеры калибров в строгом соответствии с расчетом. В таком случае приходится ставить калибр ($d_{k\ средн}$) ближайшего размера, с тем условием, чтобы отклонение его диаметра от расчетного были минимальны. Такая коррек-

тировка маршрута калибров приводит к увеличению отклонения толщины покрытия за один проход от его расчетного значения. При установленном по усредненным данным маршруте калибров уравнение (5.19) позволяет рассчитать реальную толщину лака, наносимого по каждому проходу, и толщину эмали (табл. 5.4, рис. 5.19).

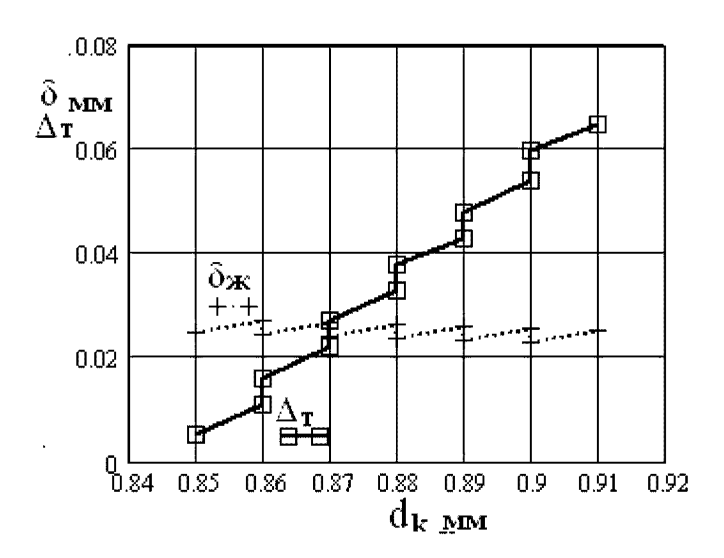


Рис. 5.19. Влияние усреднения расчетных диаметров калибров на толщину лака, наносимого на каждом проходе (........), и толщину изоляции провода по проходам (———)

При эмалировании провода диаметром 0,8 мм, при расчетном шаге калибров $h = 0{,}0055$ мм, были установлены калибры диаметром кратным 0,010 мм. Для получения заданной толщины слоя лака, наносимого на каждом проходе, диаметр калибров увеличивался на 0,01 мм через каждые два прохода.

Отклонение толщин слоев лака от расчетного значения по всем проходам составлял ±2,5 мкм, т. е. не более 10 %. Как следует из рис. 5.19, прирост толщины твердого покрытия на каждом проходе лежит в пределах 5...6 мкм. Однако это различие незначительно, и условия структурирования лака по проходам существенно не изменяются. Таким образом, рассчитанный маршрут калибров (табл. 5.4, рис. 5.19) близок к оптимальному.

Глава 6

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ С БУМАЖНОЙ, ПЛЕНОЧНОЙ И ВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В зависимости от условий эксплуатации обмоточные провода изготавливаются с изоляцией на основе пластмасс, нитей или комбинаций из вышеуказанных материалов. И в этой связи в кабельной промышленности при изготовлении обмоточных проводов применяются следующие методы наложения изоляции:

1. Обмотка лентами и нитями.
2. Экструзия.

6.1. Основные положения обмотки

Методом обмотки накладывается изоляция из бумажных, пластмассовых лент, синтетических и натуральных волокон на жилы обмоточных проводов.

Обмотка реализуется при вращении ролика ленты или бобины с пряжей вокруг жилы при ее равномерном поступательном движении. На практике применяются три способа обмотки: а) встык; б) с перекрытием; в) с зазором (рис. 6.1).

При обмотке встык кромки соседних витков лент или прядей волокнистых материалов соприкасаются друг с другом. Этот способ является основным при обмотке жил волокнистыми материалами, при наложении нескольких полимерных лент с подклейкой на жилы обмоточных проводов. Для обмотки жил бумажными лентами этот способ практически не применяется, т. к. при изгибах ленты, расположенные на наружной стороне, от средней линии расходятся, а на внутренней стороне сжимаются и образуются складки.

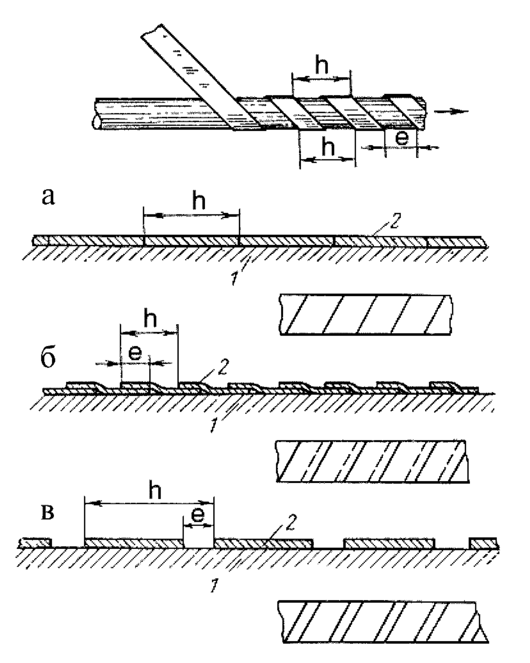


Рис. 6.1. Изолирование обмоткой

При обмотке с перекрытием кромки последующих витков лен-

ты перекрывают предыдущие. Изоляция, выполненная таким способом, имеет высокую электрическую прочность, но малую гибкость, поэтому, например, при выполнении изоляции обмоточных проводов этим способом накладывается первая и часто последняя ленты. С перекрытием изолируются жилы обмоточных и монтажных проводов полимерными лентами с последующей запечкой или без нее. При этом способе обмотки, изменяя величину перекрытия, можно получить требуемую толщину изоляции при меньшем количестве лент по сравнению другими способами обмотки.

Обмотка с зазором является основной при выполнении бумажной изоляции силовых кабелей и обмоточных проводов. При данном способе обмотки между кромками витков ленты имеется небольшой зазор не более 2 мм, который по величине много меньше ширины ленты. Изоляция, выполненная этим методом, обладает высокой гибкостью, но меньшей электрической прочностью по сравнению с изоляцией, выполненной обмоткой с перекрытием. Ленты (слои) при обмотке с зазором можно накладывать на предыдущие с 50 или 30%-м перекрытием. При обмотке с 50%-м перекрытием зазор нижележащего слоя располагается на середине ширины ленты последующего слоя, а при 30%-м перекрытии зазор находится на 1/3 ширины ленты последующего слоя.

Обмотка характеризуется следующими технологическими параметрами: шагом обмотки – h, углом обмотки – α, шириной ленты – b, величиной зазора (перекрытия) – a. Перечисленные параметры имеют определенную связь между собой и с радиальными размерами жилы.

Если развернуть один виток ленты на плоскость, то получим следующую схему, представленную на рис. 6.2.

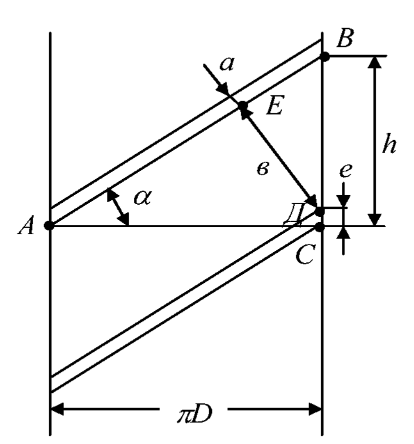


Рис. 6.2. Развертка витка ленты на плоскости:

е – аксиальная величина зазора, мм;
а – нормальная величина зазора, мм;
D – диаметр жилы, мм

Выделим ΔABC и ΔBDE. Из подобия этих треугольников (при обмотке с зазором) можно записать:

$$\frac{AB}{AC}=\frac{BD}{ED} \text{ или } \frac{\sqrt{(\pi(D+\delta))^2+h^2}}{\pi(D+\delta)}=\frac{h-e}{b}. \tag{6.1}$$

Так как для силовых кабелей $D >> \delta$, то $D + \delta = D$, тогда

$$\frac{\sqrt{\pi D^2+h^2}}{\pi D}=\frac{h-e}{b} \text{ и отсюда } b=\frac{h-e}{\sqrt{(\pi D)^2+h^2}}\pi D.$$

$$b = (h - e)\cos\alpha = h\cos\alpha - e\cos\alpha, \tag{6.2}$$

т. к. $e\cos\alpha = a$, то

$$b = h\cos\alpha - a, \tag{6.3}$$

если обозначим через $k = e/h$, $e = h$, тогда

$$b=\frac{(1-k)h}{\sqrt{(\pi D)^2+h^2}}\pi D=\pi D(1-k)\sin\alpha. \tag{6.4}$$

Таким образом,

$$b = \pi D(1 \pm k)\sin\alpha = h\cos\alpha - a = \pi D\sin\alpha \pm a. \tag{6.5}$$

Из рис. 6.2 следует, что шаг обмотки $h = \pi D\mathrm{tg}\alpha$.

Шаг наложения бумажных лент на круглые провода диаметром до 3,5 мм должен быть не более 20 мм, диаметром выше 3,5...30 мм. При обмотке прямоугольных проводов сечением более 50...35 мм.

$$h = \pi(D + \delta)\mathrm{tg}\alpha. \tag{6.6}$$

В (6.1)–(6.6) минус вводится при обмотке с зазором, плюс – при обмотке с перекрытием.

Относительное оксиальное перекрытие «$k_а$» ($k_а = e/h$) в практике чаще выражается в процентах. В расчетах в основном задается нормальное перекрытие $k_a = a/b$. Связь между $k_а$ и $k_н$ можно представить как

$$k_н=\frac{a}{b}=\frac{e\cos\alpha}{(h\pm e)\cos\alpha}=\frac{e}{h(1\pm k_а)}=\frac{k_а}{1\pm k_а}. \tag{6.7}$$

Для $k_а$ можно записать

$$k_а=k_н(1\pm k_а)=\frac{k_н}{1\pm k_н}. \tag{6.8}$$

6.1.1. Обмотка прядями волокнистых материалов

Изоляция ряда обмоточных проводов выполняется из нитей волокнистых материалов (х/б пряжи, натурального шелка, синтетических и стеклянных волокон). Нити формируются из элементарных волокон

методом кручения. Механические и технологические свойства нитей связаны с их радиальными размерами и величиной крутки (К), последняя равна количеству кручений на одном метре нити, т. е.

$$K = \frac{1000}{h_в}, \tag{6.9}$$

где $h_в$ – шаг скрутки нитей, мм.

Зависимость напряжения разрушения при растяжении ($\sigma_р$) нити от величины K проходит через максимум. Величина кручения, при которой достигается σ_{max}, называется критическим кручением. При увеличении крутки увеличивается плотность нити, уменьшаются ее радиальные размеры – толщина и деформация (плющение или настильность), увеличивается толщина изоляции. В этой связи для изолирования проводов используются нити, имеющие крутку меньше $K_{кр}$.

Для оценки толщины нити волокнистых материалов используют значение линейной плотности и метрический номер. Метрический номер нити $N_м$ указывает количество метров нити в 1 г массы. Линейная плотность нити $T_н$ выражается в тексах и указывает массу нити в граммах длиной в 1 км:

$$T = \frac{1000m}{L}, \text{ [г/км]}, \tag{6.10}$$

где m – масса нити, г; L – длина нити, м.

Линейная плотность и метрический номер связаны между собой соотношением

$$T_н = 1000/N_н. \tag{6.11}$$

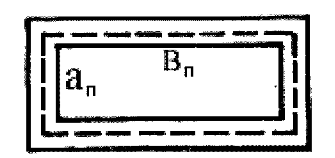
Таким образом, чем тоньше нить, тем больше ее $N_м$ и меньше $T_н$. Для изготовления обмоточных проводов в промышленности применяются различные волокнистые материалы.

Обмотку жил проводят прядями, которые состоят из нескольких параллельно уложенных нитей. Пряди формируются на тростильных машинах и наматываются на бобины крестообразной намоткой.

Обмотка прядями проводится только встык, и технологические параметры обмотки определяются следующими соотношениями:

$$h = \pi(D + \delta)\mathrm{tg}\alpha,$$
$$b = \pi(D + \delta)\sin\alpha = h\cos\alpha, \tag{6.12}$$

где D – диаметр жилы, мм; δ – радиальная толщина слоя изоляции, мм.



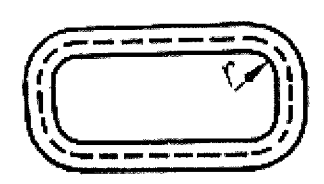


Рис. 6.3. Сечение прямоугольного провода

В обмоточных проводах толщина изоляции соизмерима с размерами жилы и поэтому пренебрегать ею в расчетах недопустимо.

Для проводов прямоугольного сечения при определении параметров h и b учитываем периметр провода $П_1$ (вместо $\pi(D + \delta)$), рис. 6.3:

$$П_1 = П_0 + 3{,}14\delta - 1{,}72, \qquad (6.13)$$

где $П_0 = 2(в_п + a_п)$ – периметр проволоки без учета закруглений на ребрах, мм; $a_п$, $в_п$ – ширина и высота проволоки, мм; r – радиус закругления, мм.

$$h = П_1 \mathrm{tg}\alpha;$$
$$b = П_1 \sin\alpha = h\cos\alpha. \qquad (6.14)$$

После расчета ширины «b» определяется количество нитей в пряди ($n_п$). Для этой цели используются зависимости ширины пряди от количества нитей ($b = f(n_п)$), полученных экспериментальным путем, в которых учитывается плющение нитей (настильность) (рис. 6.4).

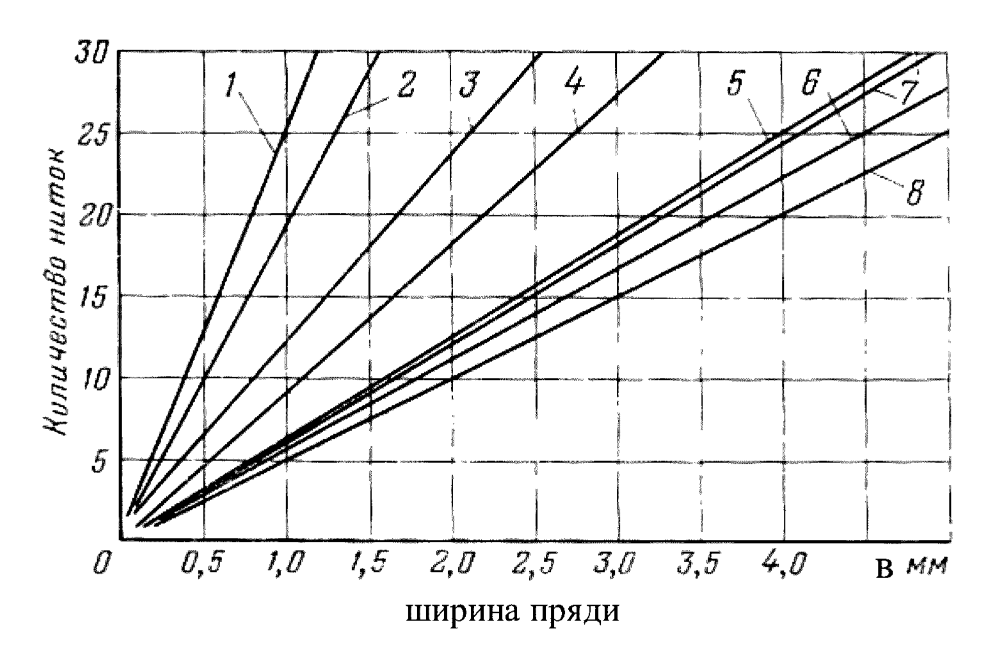


Рис. 6.4. Зависимость ширины пряди от количества нитей:
1, 2 – натуральный шелк, 3–5 – х/б пряжа;
6–8 – стекловолокно (различные линейные плотности)

На практике чаще используются специальные таблицы, где в зависимости от марки и диаметра провода указывается количество нитей (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Количество нитей в пряди

Диаметр провода, мм	Количество нитей при обмотке проводов				
	Натуральный шелк 1,89 текс (№ 529) провод ПЭЛШО	Волокно капрон 5 текс (№ 200) провода: ПЭЛШКО, ПЭШКД	Волокно лавсан 1,1 текс (№ 90) провода: ПЭЛЛО, ПЭТЛО, ПЭВЛО, ПЭПЛО	Хлопчатобумажная пряжа	
				5,9 текс (№ 170)	7,5 текс (№ 133)
				Провода: ПЭЛБО, ПЭВБД, ПЭЛБД	
0,05...0,09	3...6	–	–	–	–
0,10...1,19	6...12	–	–	–	–
0,20...0,35	8...16	4...8	3...4	–	–
0,36...0,69	14...27	8...12	5...7	12...20	–
0,7...1,0	23...29	12...16	6...9	15...25	15...18
1,01...1,56	29...32	13...18	9...11	–	16...25
1,62...2,10	–	–	–	–	16...26

6.2. Лентообмоточные машины

Машины, предназначенные для наложения изоляции на ТПЖ методом обмотки, называются обмоточными машинами. По виду накладываемой изоляции машины классифицируются на обмоточные машины для обмотки бумажными лентами, машины для наложения полимерных пленок, т. е. пленочной изоляции; обмоточные машины для наложения изоляции в виде нитей; агрегаты для изготовления проводов со стекловолокнистой изоляцией, соответственно машины называются лентообмоточными, пряжеобмоточными и стеклообмоточными. Эти машины имеют четыре основных узла и один и тот же принцип действия. С отдающего устройства через прямильное устройство жила поступает к рабочем узлу – изолировочной головке, на которой устанавливаются обмотчики. Обмотчики служат для крепления роликов кабельной бумаги, полимерной пленки или бобины с пряжей.

Все обмотчики делятся на центровые (центральные) и эксцентричные. У центровых обмотчиков ось ролика или бобины совпадает с осью изолируемой жилы. Эти обмотчики (рис. 6.5) имеют хорошую балансировку, небольшие радиальные размеры и высокую частоту вращения при изолировании силовых кабелей до 1000 об/мин, а обмоточных проводов до 10 000 об/мин. Центровые обмотчики для изолирования

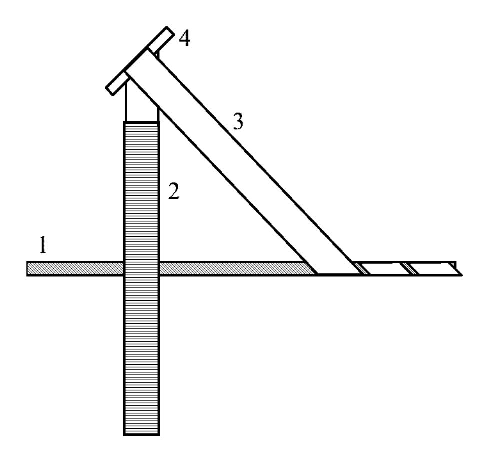


Рис. 6.5. Центральный обмотчик: 1 – ТПЖ; 2 – бумажный ролик; 3 – лента; 4 – направляющий палец

жил большой длины требуют установки запасных роликов или бобин (магазинов), что приводит к увеличению аксиальных размеров машин. Такие обмотчики имеют ограниченное применение при изолировании жил малого сечения низковольтных кабелей и являются основным типом обмотчиков при изолировании обмоточных проводов. К эксцентричным обмотчикам относятся обмотчики, у которых оси роликов (бобин) и жилы не совпадают. Эксцентричные обмотчики делятся на простые, плоские, тангенциальные и полутангенциальные (рис. 6.6). У простых обмотчиков плоскость ролика располагается под некоторым углом к жиле, равном углу обмотки. Лента к жиле подходит через направляющий палец (ролик). С изменением диаметра бумажного ролика изменяется и положение ленты, величина зазора и т. д. Эти обмотчики не обеспечивают качественного наложения лент и в настоящее время для изолирования практически не используются. У плоского обмотчика ось ролика параллельна оси жилы. Обмотчики имеют небольшие радиальные размеры, при вращении испытывают незначительное сопротивление воздуха и имеют частоту вращения до 300...350 об/мин. Они использовались для изолирования жил низковольтных кабелей, наложения поясной изоляции. В настоящее время применение их ограничено. В тангенциальных обмотчиках ось ролика перпендикулярна оси жилы, а средняя линия ленты является касательной к поверхности изолируемой жилы. За счет этого достигается равномерное натяжение кромок ленты и плотное наложение изоляции. Дан-

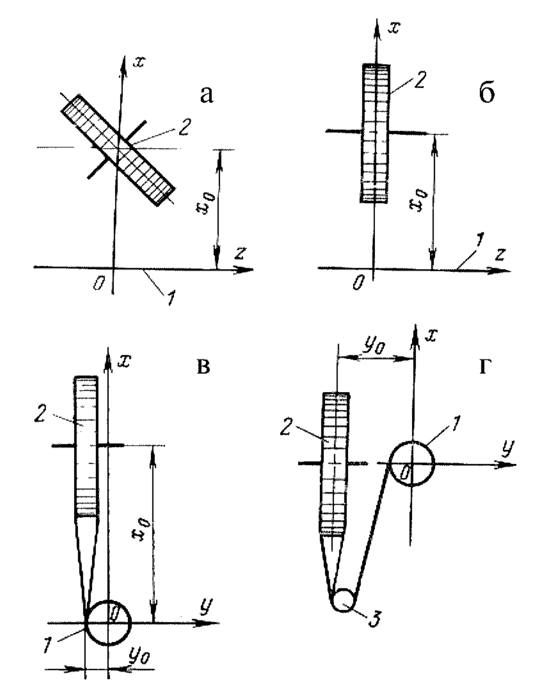


Рис. 6.6. Эксцентричные обмотчики: а – простой; б – плоский; в – тангенциальный; г – полутангенциальный; 1 – ТПЖ; 2 – ролик ленты; 3 – направляющий палец

ный тип обмотчика применяется для изолирования кабелей и является основным при наложении изоляции на жилы обмоточных проводов. В полутангенциальных обмотчиках ось ролика перпендикулярна оси жилы, но средняя линия ленты не является касательной к поверхности жилы. Ролики ленты достаточно близко располагаются к токопроводящей жиле, в результате уменьшаются радиальные габариты головки и повышается частота вращения обмотчиков до 700...900 об/мин. Эти обмотчики широко используются в современных лентообмоточных машинах для изолирования жил кабелей и проводов.

Для изолирования силовых кабелей и проводов применяются в основном горизонтальные лентообмоточные машины. Отдающее инерционное устройство пинольного типа обеспечивает установку барабана (катушки) определенных габаритов. Рабочий узел выполняется в виде изолировочных головок, на которых располагаются бумагообмотчики ранее рассмотренных типов (рис. 6.7). Головки с центральным обмотчикам имеют один ролик ленты, с полутангенциальными – от 2 до 12, тангенциальными – от 8 до 20 лент. Для уменьшения производственного шума, снижения сопротивления воздуха при вращении ролика головки имеют защитный кожух. Обмотчики рассчитаны на установку роликов лент диаметром 400, 500, 600 мм.

Увеличение размеров роликов уменьшает количество остановок машины для перезаправок. Лента с бумажного ролика поступает на направляющие металлические ролики, установленные на направляющих штангах, и закрепляется на поверхности жилы. Изолирование целесообразно проводить при постоянном натяжении ленты. Каждый обмотчик на современных машинах имеет устройство для поддержания постоянного натяжения ленты. Величина натя-

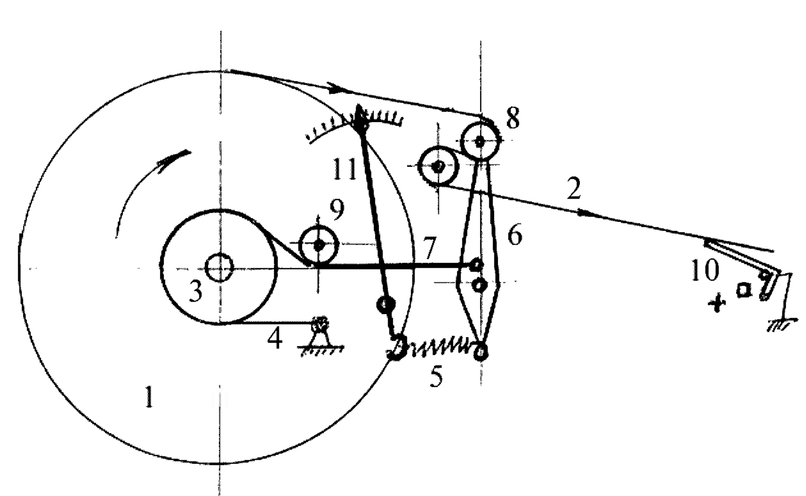


Рис. 6.7. Схема устройства регулировки натяжения ленты: 1 – бумажный ролик; 2 – лента; 3 – тормозной шкив; 4 – стальная лента; 5 – пружина; 6 – коромысло; 7 – стержень; 8 – направляющий ролик; 9 – ролик; 10 – автомат для остановки машины; 11 – рычаг для регулировки натяжения

жения задается пружиной, и для регулирования натяжения в широких пределах обмотчик имеет пять или более торированных пружин. Схема устройства представлена на рис. 6.7. Обмотчики имеют автомат для остановки машины в случае схода или обрыва ленты.

При изолировании жил различного сечения для каждого размера устанавливается тангенциальное положение средней линии ленты путем углового смещения одной половины обмотчиков относительно другой.

Таблица 6.2

Характеристики изолировочных машин

Показатели машин	0-8-М	ОГ 8	ОГ 12	ОГ 24	ОГ 32	ОГ 48
Сечение изолируемых жил, мм^2	2,5...12,5	12,5...80	12,5...80	25...120	25...120	25...120
Максимальная толщина изоляции, мм	0,96	0,96	0,44	2,88	3,84	5,76
Максимальное число накладываемых лент	8	8	12	24	32	48
Число изолировочных головок	4	2	3	3	4	6
Количество лент на головке	2	4	4	8	8	8
Частота вращения обмотчиков, об/мин	700	500	500	425	425	425
Максимальный диаметр ролика, мм	300	400	400	480	480	480
Линейная скорость, м/мин	4,7...14	5...15	5...15	6...30	6...30	6...30

6.3. Пряжеобмоточные машины

Для обмотки проводов натуральными и синтетическими волокнами применяются пряжеобмоточные машины, которые преимущественно выполняются многоходовыми с вертикальным расположением ходов. Каждый ход машины включает в себя отдающее устройство, пряжеобмотчики, тяговое и приемное устройства и служит для изолирования одной жилы. Несколько ходов устанавливаются на единой станине с одной или с двух сторон. Принципиальная схема работы машины представлена на рис. 6.8.

Отдающие устройства машины просты и разнообразны по конструкции. Это инерционные осевые устройства, часто с тормозным диском для регулирования натяжения проволоки. Проволока с отдающего устройства проходит через протиры, выполненные из нескольких параллельно уложенных пластин фетра, где очищается от металлической пыли и загрязнений. Затем поступает к обмотчикам. В этих машинах в основном используются центральные (центровые) обмотчики, рис. 6.9.

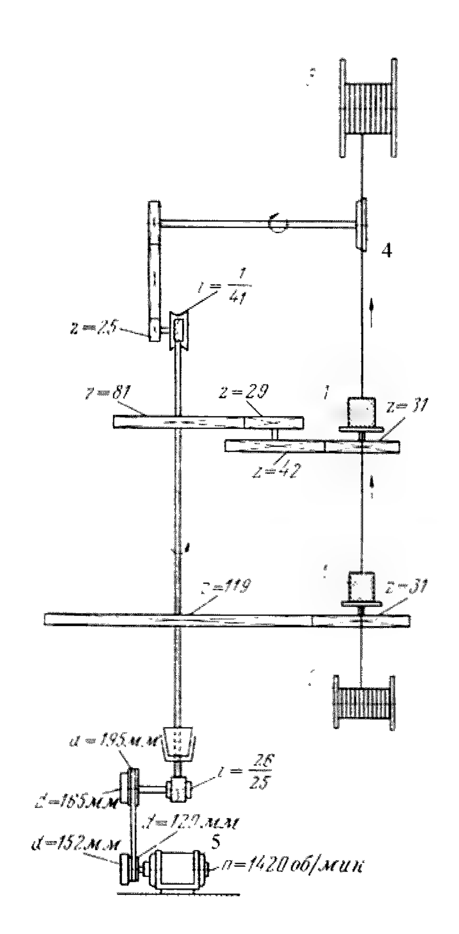


Рис. 6.8. Рабочая схема машины: 1 – обмотчики; 2, 3 – отдающее и приемное устройства; 4 – тяговая шайба; 5 – электродвигатель

Благодаря хорошей балансировке обмотчики имеют до 10 000 об/мин. Обмотчик имеет полый вал, в нижней части которого закреплена шестерня, связанная с системой привода. На верхней части вала закреплен диск для установки стакана (кожуха). На конце вала закрепляется патрон, на котором устанавливается бобина с пряжей. В нижней части патрон имеет металлический диск, связанный с фрикционным устройством, для регулирования натяжения нити. Верхней частью патрон соприкасается с гайкой, которая позволяет изменять давление патрона на фрикционную прокладку. Провод движется внутри вала, попадает в ниппель, где обматывается прядью, а затем проходит между двумя стальными пластинами-гладилками для выравнивания поверхности изоляции. В некоторых машинах обмотчики оснащаются автоматами остановки машины при обрыве пряди. В таких конструкциях обмотчиков натяжение пряди по мере уменьшения диаметра

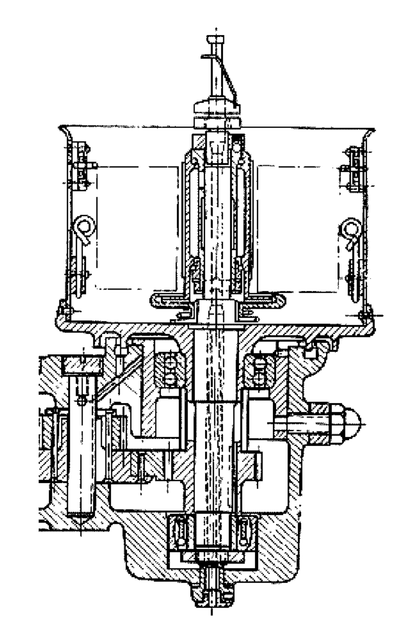


Рис. 6.9. Центральный нитеобмотчик

бобины постепенно возрастает, ибо сила трения во фрикционном устройстве задается давлением гайки на патрон при заправке машины.

В машинах над каждым центровым обмотчиком устанавливаются специальные трубки (внутри которых проходит изолированный провод) для подвески 2–3 запасных бобин с пряжей, благодаря которым можно производить замену бобину без разрезания провода.

В отечественной практике пряжеобмоточные машины классифицируются по диаметру изолируемых проводов:

1. Машины для изолирования проводов диаметром 0,05...0,38 мм.
2. Машины для изолирования проводов диаметром 0,38...1,56 мм.
3. Машины для изолирования проводов диаметром 1,0...4,0 мм.

К первой группе относятся машины марки О1-28-Э. Они имеют 28 ходов с двухсторонним расположением ходов на станине. Позволяет накладывать однослойную изоляцию из натурального шелка или синтетических волокон. Центровой обмотчик имеет индивидуальный высокочастотный приводной двигатель.

Ко второй группе можно отнести машины О2-2-Э, О2-16-Э, соответственно, двух- и шестнадцатиходовые машины. Они служат для наложения двухслойной изоляции. Машины О2-16-Э имеют двухстороннее расположение ходов – по 8 ходов с каждой стороны. На каждые 8 ходов устанавливается общий приводной двигатель.

В третью группу входят машины марок О3-6-Э, О3-8-Э, соответственно, на 6 и 8 ходов. Они служат для наложения трехслойной комбинированной изоляции с помощью трех центровых обмотчиков. Каждый ход машины имеет индивидуальный приводной двигатель.

Таблица 6.3

Характеристики пряжеобмоточных машин

Марка машины	Число ходов	Число обмотчиков на ход	Диаметр изолируемой проволоки, мм	Частота вращения обмотчиков, об/мин	Шаг обмотки, мм	Линейная скорость, м/мин
О1-28-Э	28	1	0,05...0,38	6600,8400,10000	0,6...1,2	3,96...12,0
О2-16-Э	16	2	0,38...1,56	3500, 3436,5521, 5330	0,92...2,43	3,9... 8,3
О2-2 -Э	2	2	0,38...1,56	3600	0,9...2,42	3,16... 8,5
О3-6 -Э	6	2	1,0...4,0	764...2000	1,64...5,59	3,1...12,68
О3-8 -Э	8	3	1,0...4,0	764...2000	1,64...5,59	3,1...12,68

6.3.1. Изолирование лентами жил проводов

Бумажная изоляция проводов в основном накладывается с зазором, величина которого не должна превышать 2 мм. При обмотке жил стремятся выполнить два условия:

1) обеспечить необходимое качество изоляции;
2) достичь при этом высокой производительности обмоточных машин.

При выполнении первого условия необходимо обеспечить:

- высокую плотность изоляции;
- одинаковое натяжение кромок лент;
- строго определенное положение витков лент на жиле, без каких-либо сдвигов и совпадения зазоров.

Плотность изоляции в значительной степени связана с величиной и постоянством натяжения ленты и углом обмотки. Усилие натяжения P (рис. 6.10), действующее вдоль ленты, можно разложить на P_1 и P_2:

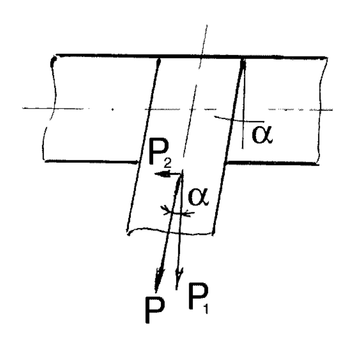


Рис. 6.10. Схема сил, действующих на ленту

$$P_2 = P\sin\alpha,\ P_1 = P\cos\alpha, \qquad (6.15)$$

где P_2 – аксиальная составляющая P, вызывает смещение ленты на жиле; P_1 – определяет нормальное усилие сжатия и влияет на плотность изоляции. Чем меньше угол обмотки, тем больше P_1 и выше плотность изоляции. С уменьшением угла α уменьшается шаг обмотки h, снижается линейная скорость обмотки $\upsilon_л = hn_{об}$, но одновременно повышается гибкость изоляции.

При увеличении ширины ленты возрастает производительность машин, но снижается плотность и гибкость изоляции. Таким образом, реализация вышеназванных условий возможна при компромиссном подходе к выбору технологических параметров обмотки. В связи с тем, что обмотка лентами ведется с 30%-м перекрытием слоев, отсутствие совпадения зазоров можно достичь, если изолирование проводить с постоянным шагом, т. е. h = const, при этом применяя ленту одинаковой ширины.

Так как $h = \pi D\text{tg}\alpha$ = const, то по мере наложения изоляции диаметр возрастает, а угол будет уменьшаться.

При обмотке с зазором при постоянной ширине ленты $b = h\cos\alpha - a =$ = const зазор «a» будет возрастать. Диапазон изменения величины зазора «a», при котором практически не происходит уменьшения электрической прочности изоляции, находится в пределах a = 0,5...2,0 мм.

6.4. Стеклообмоточные агрегаты и особенности наложения стекловолокнистой изоляции

По сравнению с натуральными и синтетическими волокнами, стекловолокно имеет пониженную стойкость к истирающим нагрузкам, высокий модуль упругости, поэтому требует подклейки к жиле и пропитки изоляции с последующей термообработкой. Образующаяся на проводе изоляция представляет собой композиционный материал из стекловолокна и цементирующего его полимера.

Изготовление обмоточных проводов со стекловолокнистой изоляцией в настоящее время проводится по совмещенной технологии, при которой подклейка, обмотка, пропитка и последующая термообработка изоляции производится на специальных стеклообмоточных агрегатах. В отличие от обычных обмоточных машин, стеклообмоточные агрегаты имеют лаковые ванны для пропитки, подклейки и лакировки поверхности провода, электрические печи для запечки лака.

Совмещенная технология реализуется по двум вариантам:

1) с запечкой (термообработкой) по внешнему слою изоляции;
2) с послойной запечкой, т. е. термообработкой каждого слоя изоляции, рис. 6.11.

Практика показывает, что лучшее качество проводов обеспечивается при использовании послойной запечки. В последнем случае усложняется схема машины, ее заправка, повышаются энергоемкость и габариты машины. Поэтому послойная запечка находит применение при изготовлении проводов с сечением жил 10 и более мм^2.

Технологические параметры обмотки выбираются с учетом устойчивости изоляции. В работах ВНИИКП показано, что оптимальной величиной углов обмотки α = 26...28°. Эти значения углов определяют ширину пряди и т. д.

В связи с тем, что при изготовлении проводов со стекловолокнистой изоляцией совмещаются две технологические операции – обмотка и термообработка, линейная скорость агрегата определяется временем физико-химических процессов (испарение растворителя и поликонденсация), протекающих в изоляции при термообработке. Свойства стекловолокнистой изоляции, особенно механические, определяются степенью завершенности процесса поликонденсации лаковой пленки и связаны с температурой печи. Для большинства лаков температура запечки составляет 350...450 °С.

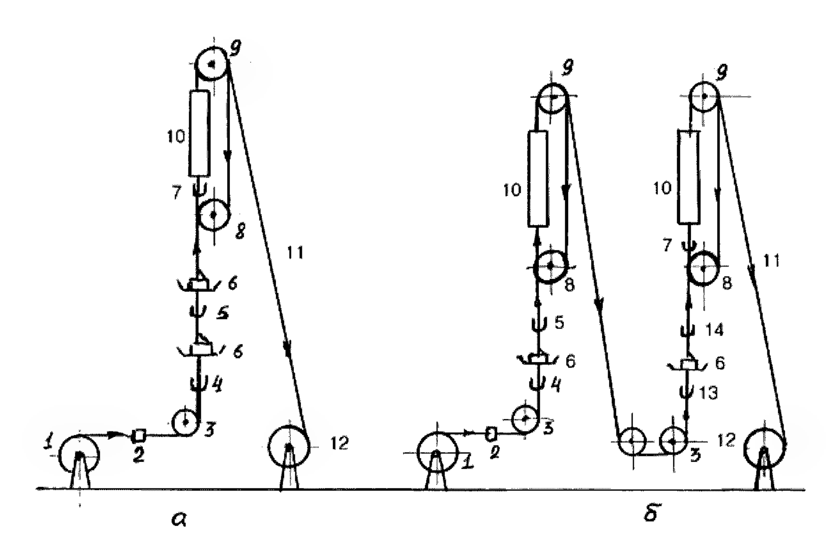


Рис. 6.11. Схема совмещённой технологии изготовления проводов со стекловолокнистой изоляцией:
а – запечка по внешнему слою; б – послойная запечка; 1 – отдающее устройство; 2 – фетровые протиры; 3 – направляющие ролики; 4 – лаковая ванна для подклейки; 5 – ванна для пропитки первого слоя и подклейки второго слоя; 6 – центровой пряжеобмотчик; 7, 15 – ванна для лакировки поверхности провода; 8 – блок нижних направляющих роликов печи; 9 – блок верхних направляющих роликов; 10 – электрические печи; 11 – изолированный провод; 12 – приемное устройство; 13, 14 – лаковые ванны для подклейки и пропитки второго слоя

На отечественных заводах применяются несколько типов агрегатов, табл. 6.4.

Таблица 6.4

Стеклообмоточные агрегаты

Показатели	2СОГ-0,4М	2СОВ-1	2СОВ-2,5	2СОВ-2,5М	СОГ10	СОГ-60
1. Тип машины	гориз.	вертик.	вертик.	вертик.	гориз.	гориз.
2. Диаметр или сечение проводов, мм	0,2...0,65	0,5...1,2	1,0...2,5	2...10 1,56...5,2	2,5...25 0,2...5,2	15...60
3. Частота вращения обмотчиков, об/мин	2500...3500	2000...4000	2160...4000	2040...3530	1460...3080	до 3000
4. Линейная скорость, м/мин	1,55...6,27	5...10	5...10	3,08...14,07	3,5...12,4	3,7...10
5. Количество ходов	2	2	2	2	1	1
6. Установленная мощность на 1 ход, кВт	11,5	36	36	36	70	40
7. Длина печи, м	1,4	2,5 2-камер.	2,5 2-камер.	2,5 2-камер.	4 6-камер.	4 4-камер.
8. Максимальная температура печи, °С	600	600	600	600	600	600
9. Габариты, $L \times B \times H$ (м)	4,75×1,0××1,95	3,4×4,3××5,4	4,3×4,85××5,4	4,2×6,4××6,0	14,6×2,1××2,65	18,5×1,66××2,71

Подклейка и пропитка стекловолокна проводится лаками на полиуретановой, полиэфирной, кремнийорганической основах. Для проводов с температурным индексом 155 °С применяются глифталевые лаки ФА-97, ГФ-985 (-986), с температурным индексом 180 °С – кремнийорганические лаки КО-916, КО-916К, КО-916А. Для проводов с рабочей температурой 300...350 °С и более используются специальные составы. При использовании лаков для подклейки и пропитки стекловолокна во время термообработки изоляции выделяется значительное количество паров растворителя лака, которое выбрасывается в окружающую среду. В этой связи для повышения экологической безопасности производства проводов с температурным индексом не выше 155 °С применяется стеклополиэфирное волокно, содержащее до 50 % волокон полиэтилентерефталата. Стеклополиэфирная нить формируется при скрутке стеклянной и полиэфирной нитей. При изолировании проволоки стеклополиэфирным волокном применение лака сокращается в 3–4 раза, т. к. при термообработке волокна склеиваются между собой. Такая изоляция имеет высокую механическую прочность на истирание.

Глава 7
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОДОВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ПОВЫШЕННОЙ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ

7.1. Технология изготовления проводов с пленочной изоляцией

Наложение бумажной и пленочной изоляции обмоточных проводов производится на лентообмоточных машинах. Конструкции этих машин различаются количеством ходов, типом и количеством обмотчиков, тяговыми устройствами, диаметром или сечением изолируемых проводов. Для изолирования круглых проводов диаметром до 4 мм и прямоугольных – сечением до 12 мм^2 применяются вертикальные 8- или 16-ходовые машины с центральными обмотчиками на каждый ход (03-6-Э, 03-3-Э, 02-16-Э) с регулируемым натяжением ленты или пряди. Эти машины позволяют изготовить провода с комбинированной пленочно-волокнистой или бумажно-волокнистой изоляцией. Особенностью машин является применение индивидуального электропривода для каждого хода. Горизонтальные машины применяются для выполнения изоляции максимальной толщиной от 0,96 до 5,73 мм проводов сечением 2,5...120 мм^2. Характеристики некоторых горизонтальных машин представлены в табл. 7.1.

Машины ОГ-8 и ОГ-12 близки по конструкции, но различаются по количеству обмотчиков, количеству лент, накладываемых на проволоку. На ОГ-8 накладывается восемь лент, ОГ-12 – двенадцать лент. Машины ОГ-24, ОГ-32 и ОГ-48 различаются количеством обмотчиков и соответственно лент, накладываемых на провод за один проход через машину. В горизонтальных машинах применяются обмотчики тангенциального типа, которые обеспечивают равномерное натяжение лент и плотное наложение изоляции. Обмотчики имеют устройство поддержания постоянного натяжения лент при обмотке проволоки независимо от диаметра ролика ленты и устройство для автоматической остановки машины при обрыве или сходе ленты. За исключением машин ОГ-27 и ОГ-08, горизонтальные машины оснащены тяговыми устрой-

ствами гусеничного типа. Эти устройства выполняются с двумя вертикально расположенными гусеницами, которые движутся в противоположные стороны с одинаковой скоростью. Гусеничные тяговые устройства создают минимальное удельное давление на изоляцию провода и исключают проскальзование и смещение провода как при работе, так и остановке машины. Все машины имеют инерционные приемные устройства пинольного типа.

Таблица 7.1

Характеристики лентообмоточных машин

Показатели	Вертикальные			Горизонтальные					
	03-3-Э	03-6-Э	02-12-Э	08	ОГ-08	ОГ-12	ОГ-24	ОГ-32	ОГ-48
1. Сечение изолированных проводников (мм^2)	0,78...12,5	0,78...12,5	2,5...8	2,5...12,5	12,5...80	12,5...80	25...120	25...120	25...120
2. Число ходов	3	6	12	1	1	1	1	1	1
3. Число обмотчиков	3	3	2	4	2	3	3	4	6
4. Максимальное количество лент	3	3	2	8	8	12	24	32	48
5. Частота вращения обмотчика (об/мин)	764...2000	764...2000	764...2000	700	500	500	425	425	425
6. Скорость изолирования (м/мин)	3,1...12,68	3,1...12,68		4,7...14	5...15	5...15	6...30	6...30	6...30

7.2. Технология и оборудование для изготовления проводов повышенной нагревостойкости

Изготовление проводов со спекаемой пленочной изоляцией. Обмоточные провода повышенной нагревостойкости с температурой эксплуатации 200...250 °С выполняются с изоляцией на основе политетрафторэтилена (Ф-4), полиамидимида и полиимида.

В основном изоляция выполняется из лент Ф-4 и полиимида (ПМ). В изделиях, эксплуатирующихся в средах с повышенной влажностью или в жидких средах (вода, нефть, минеральное масло и т. п.), необходима монолитная изоляция, имеющая низкую водопроницаемость.

Монолитность изоляции, выполненной обмоткой лентами с перекрытием, достигается при ее термообработке (спекании) при температуре до 370 °С.

При выполнении изоляции из фторполимера используются ленты из неориентированной или сырой каландрированной ленты (Ф-4). Для наложения таких лент используются машины марок МО-2 и ГИМ-3А, оснащенные специальными устройствами для поддержания необходимого низкого натяжения, при котором исключается вытяжка и обрыв ленты. Ленты должны накладываться плотным слоем без морщин и неплотностей.

Последующая термообработка изоляции может проводиться путем ее нагрева в электропечах сопротивления или нагревом токами высокой частоты.

Для спекания изоляции из неориентированных лент Ф-4, как показывают исследования, необходимо сжатие между слоями не менее 0,5 МПа, которое создается при натяжении лент во время обмотки 10^3 Н/м.

Для создания необходимого сжатия между слоями фторполимерных лент верхняя лента берется из ориентированной пленки. При температурах менее 370 °С лента дает усадку и снимает внутренние слои изоляции, однако при выборе температурного режима запечки учитывается, что при более 370 °С ориентированная пленка растрескивается. В этой связи выбор оптимального температурного режима запечки и способа нагрева определяет качество изоляции провода.

При нагреве изоляции в печи наиболее нагретой будет внешняя, а наименее нагретой внутренняя поверхность изоляции. Из-за низкой теплопроводности изоляции перепад температур в изоляции толщиной 0,5...1,0 мм составит 20...40 °С (рис. 7.1, *а*) и может возрастать с увеличением сечения провода. При высокочастотном нагревании энергия подается на жилу, а от нее за счет теплопроводности происходит нагревание изоляции. Распределение температуры в изоляции представлено на рис. 7.1, *б*. Внутренние слои имеют температуру, достаточную для хорошего спекания. Высокочастотный нагрев имеет ряд преимуществ:

а) интенсивное нагревание жилы;

б) быстрое изменение и выход на заданный режим.

Для высокочастотного нагревания жил могут применяться два вида индукторов: соленоидный и петлевой. Петлевой целесообразно использовать для нагревания проводов небольшого сечения, соленоидный – для проводов (жил) большого сечения.

Изолирование и запечка изоляции могут реализовываться по раздельной или совмещенной технологиям. Преимущество совмещенной технологии, при которой изолирование и запечка происходят последовательно и непрерывно на одной линии, очевидно! Эта технология реализована на линии ЛТП. Она служит для изготовления медных обмо-

точных проводов сечением 5...60 мм^2 с полимидно-фторопластовыми лентами при линейной скорости 1,4...14 м/м (рис. 7.2). Линия имеет два обмотчика с максимальной частотой вращения 2000 об/мин и устройствами поддержания постоянного натяжения лент. Линия имеет индукционную печь с петлевым индуктором. Индуктор охлаждается водой. Для полного спекания изоляции за индуктором устанавливается электрическая печь, состоящая из четырех секций. В каждой секции устанавливаются по 6 тэнов. Окончательная запечка производится при температуре 400 °C. В случае остановки машины электрическая печь поднимается и провод оказывается за пределами зоны нагрева. После запечки провод охлаждается в водяной ванне и подвергается сушке воздухом под избыточным давлением. Тяговое устройство выполнено в виде шайбы с прижимным ремнем.

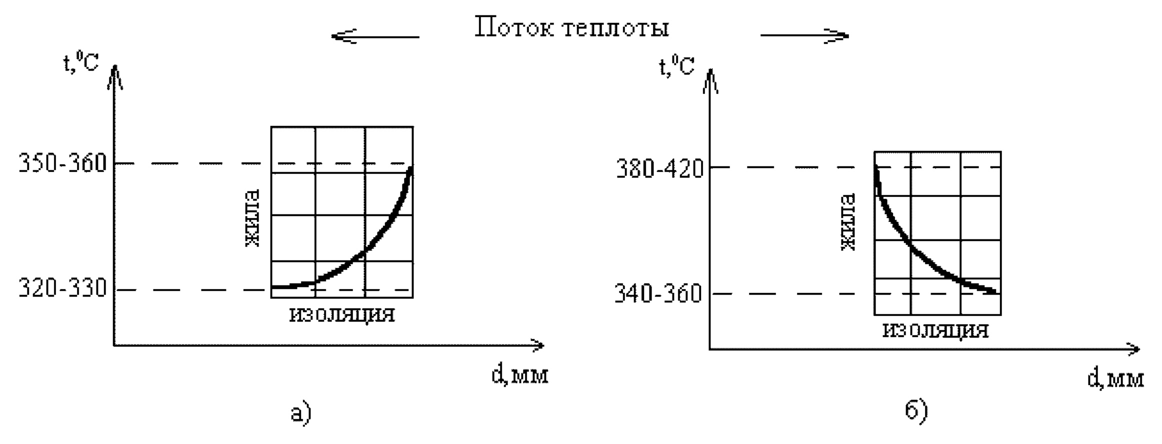


Рис. 7.1. Распределение температуры в изоляции провода

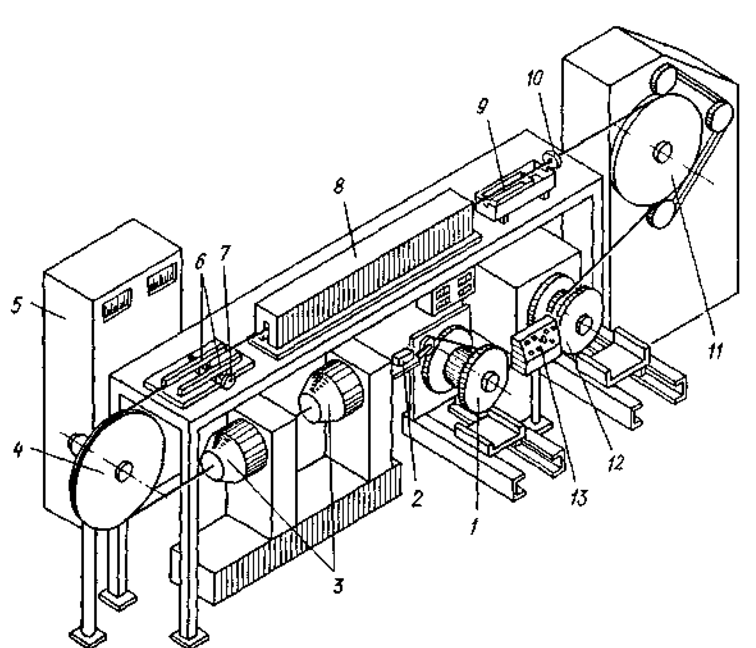


Рис. 7.2. Общий вид марки ЛТП для обмотки лентами и высокочастотной запечки изоляции из фторопластовых и полиимидно-фторопластовых лент:
1 – отдающее устройство;
2 – протир; 3 – обмотчик;
4 – поворотное колесо;
5 – генератор; 6 – индуктор;
7 – рукоятка регулирования индуктора; 8 – печь;
9 – ванна; 10 – калибр;
11 – тяговое устройство;
12 – приемное устройство;
13 – пульт управления

7.3. Изготовление проводов с гибкой неорганической изоляцией

Для эксплуатации при повышенных температурах (300...700 °С) применяются обмоточные провода с изоляцией из керамических материалов, стеклоэмали и стекла. Эти материалы обладают высокими электроизоляционными свойствами. Керамические составы при комнатной температуре имеют удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{12}$ Ом·м, при 600 °С – 210^5 Ом·м, стекло эмали – $\rho_v = 10^{14}$ Ом·м при 20 °С и 10^7 Ом·м при 400 °С. Основным недостатком этих материалов является повышенная хрупкость. При динамических нагрузках на провода, изгибах изоляция может разрушаться. Повышение механических свойств изоляции обеспечивается как подбором составов керамических материалов и стеклоэмалей, так и подготовкой поверхности проволоки перед нанесением изоляции, а также нанесением на поверхность изоляции дополнительного покрытия из суспензий и полиорганосиликатных материалов.

В этой связи технологический процесс изготовления проводов с гибкой керамической или стеклоэмалевой изоляцией включает три операции:

1) подготовка поверхности двух- или трехслойного проводника перед нанесением изоляции;
2) наложение слоя и его запечка или оплавление;
3) наложение на поверхность покрытия после термообработки защитного слоя из полиорганосиликатного материала.

В технологическом процессе, как правило, объединяются первые две операции, что позволяет упростить конструкцию оборудования. Общий вид такой установки представлен на рис. 7.3.

Первая операция – очистка поверхности проволоки – может производиться механическим способом, электрохимическим способом или обработкой в определенных растворителях. У некоторых проводников, в частности никелевых или биметаллических Cu-Ni, производится окисление поверхности. Слой окислов, образовавшийся на поверхности проволоки, повышает адгезию изоляции к проводнику. Вторая операция – наложение керамического или стеклоэмалевого покрытия – реализуется методами окунания или электрофореза из водной суспензии неорганических материалов. При этом принимаются меры для равномерного наложения покрытия по периметру и длине провода.

Термообработка покрытия производится при температурах 700...1100 °С. При температуре выше 700 °С резко снижается разру-

шающее напряжение металлов проводников, и поэтому при изготовлении провода необходимо обеспечить минимальное натяжение провода в печи, отсутствие динамических нагрузок на провод, скольжения на тяговом устройстве.

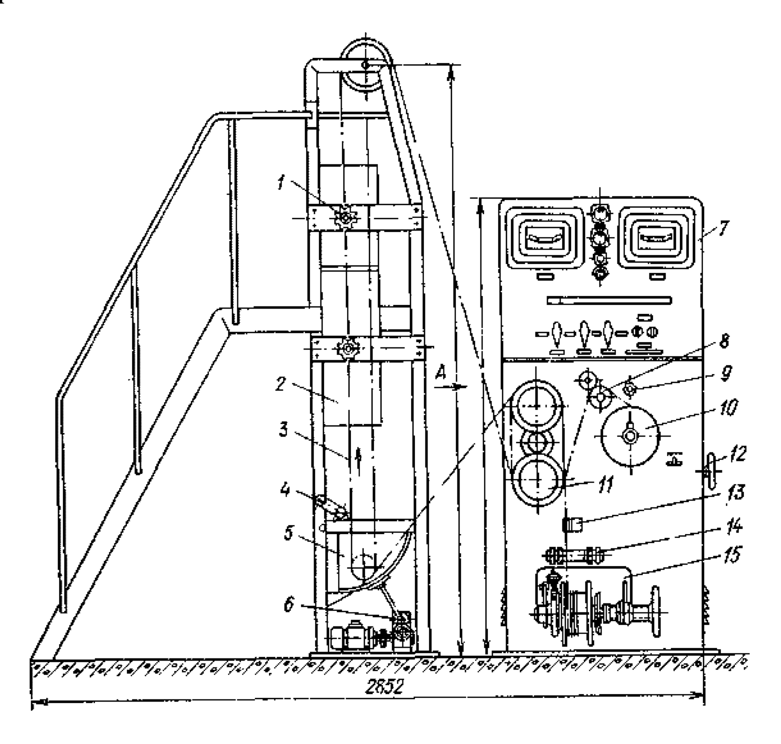


Рис. 7.3. Установка для наложения на проволоку гибкой керамической или стеклоэмалевой изоляции:
1 – крепление печи; 2 – печь; 3 – изолированная проволока; 4 – рукоятка для заправки проволоки; 5 – ванна с суспензией; 6 – механизм перемешивания суспензии; 7 – шкаф с электрооборудованием; 8 – ролик раскладки; 9 – ручка управления приемным фрикционом; 10 – приемная катушка; 11 – тяговое устройство; 12 – штурвал вариатора скорости; 13 – фетровый протир; 14 – направляющий ролик; 15 – отдающее устройство с катушкой

На установке, представленной на рис. 7.3, накладывается изоляция на проволоку диаметром 0,2...0,8 мм. С отдающей катушки провод через ролик и фетровое протирающее устройство поступает на тяговое устройство в виде двух тяговых шайб и обматывается вокруг них несколько раз. Далее проволока проходит в ванну с суспензией для нанесения изоляции. Ванна выполняется из органического стекла, в нее вставляется вкладыш из органического стекла с медной трубкой. Трубка выполняет роль катода при электрофоретическом методе наложения изоляции. Ванна имеет резиновую диафрагму и приспособление для создания вибрации диафрагмы. Благодаря вибрации исключается осаждение частиц суспензии на стенках ванны, и они остаются во взве-

шенном состоянии. Наложение стеклоэмалей на провод требует, в виду ее повышенной плотности, повышенной интенсивности, которая обеспечивается за счет применения дополнительной мешалки.

Электрическая печь обеспечивает оплавление покрытия стекла эмали и стекание керамики при температурах до 1100 °С.

7.4. Каталитическое сжигание паров растворителя в эмаль-печах

Лаки, применяемые для изготовления эмалированных проводов, имеют в своем составе токсичные растворители (табл. 7.2), концентрация и вид которых связаны, прежде всего, с химическим составом. В табл. 7.2. представлено содержание (смолы) сухого остатка и растворителя или композиции растворителей некоторых эмаль-лаков.

Таблица 7.2

Состав эмаль-лаков

№ п/п	Марка эмальлака	Растворитель	Содержание растворителя, %	Массовая доля нелетучих веществ, %	Химическая основа
1	ПЭ-943А	крезол, сольвент	68...64	32...36	Полиэфир
2	ПИ-155А	этилкарбитол, сольвент	55...51	45...49	Полиэфиримид (б/к)
3	ПИ-155Б	этилкарбитол, сольвент	62...58	38...42	Полиэфиримид (б/к)
4	УР-155К	этилкарбитол, сольвент	72...68	28...32	Полиуретан
5	ПАИ-200А	N-метилпиролидон, ксилол	76...72	24...28	Полиамидимид (б/к)
6	ПАИ-200Б	N-метилпиролидон, ксилол	80...76	20...24	Полиамидимид (б/к)

Примечание: б/к – бескрезольный

Из табл. 7.2 следует, что содержание растворителей в современных лаках более 50 %. Выбрасываемые в окружающую среду пары растворителей, образовавшиеся при термообработке эмалированных проводов, нарушают требования по экологии среды.

Одним из основных методов повышения экологической безопасности производства эмалированных проводов является очистка газов, выходящих из эмаль-печи от паров растворителя и продуктов неполного сгорания органических веществ путем их каталитического сжигания. При каталитическом сжигании паров образуются CO_2 и H_2O.

В настоящее время в кабельной промышленности применяются цельнометаллические катализаторы, имеющие носители в виде плющеной проволоки из нихрома с активным слоем на основе палладиевой черки. Такие катализаторы обладают высокой эффективностью и механической прочностью.

Основным недостатком этих катализаторов являются отслаивание и потери палладия в процессе очистки. У оксидных катализаторов часто происходят отказы из-за деградации поверхностного состава при совместном воздействии температуры и реакционной среды ввиду уменьшения удельной поверхности, пористой структуры и механической прочности.

В последние годы разработаны катализаторы на основе поропенистых блоков из никеля, на поверхности которых наносился дисперсный слой оксида алюминия, а затем слой активного палладия.

В присутствии катализаторов реакция окисления (горения) органических веществ протекает при температурах газа, поступающего в катализатор примерно при температуре 400 °С и не выше 600 °С. Температура газа после катализатора повышается, и это зависит от концентрации паров растворителей. Газы, поступающие в катализатор, не должны содержать галогены, пары ртути, свинца, цинка и т. д. Горячие газы после катализатора, в современных эмаль-агрегатах, вентиляторами подаются в первую и вторую тепловые зоны камеры печи. Тепло горячих газов и величина их потоков позволяет создать необходимую температуру и характер ее распределения в каждой зоне. Если температура в первой зоне должна быть не выше температуры кипения чистых растворителей, то во второй зоне температура должна быть значительно выше и обеспечивать процесс пленкообразования.

7.5. Тростильные машины

Обмотка проводов проводится прядями, которые образуются в процессе тростки. Тростка – это параллельное соединение некоторого количества нитей в прядь и намотка прядей на бобины. Процесс трощения реализуется на тростильных машинах, принципиальная схема которой представлена на рис. 7.4.

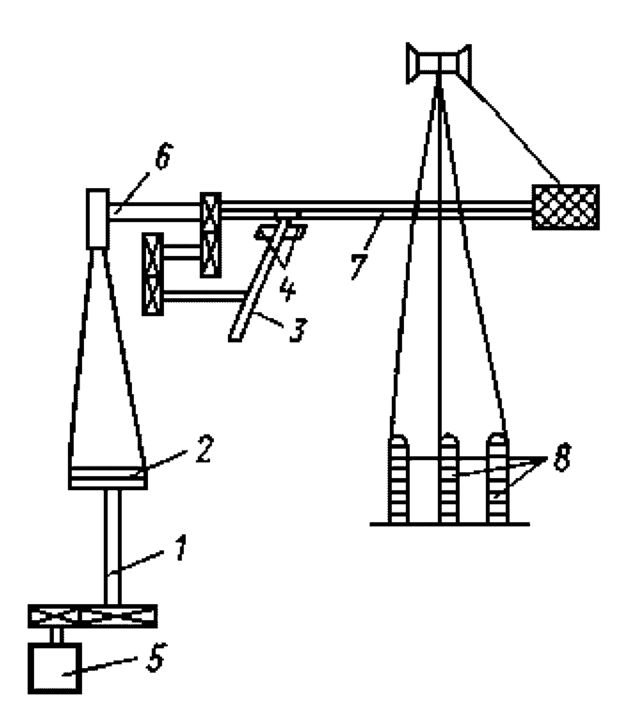


Рис. 7.4. Принцип действия тростильной машины:
1 – коренной вал; 2 – шкив; 3 – эксцентрик; 4 – валики; 5 – электродвигатель; 6 – направляющая; 7 – стержень; 8 – бобины с одиночными нитями

Нити с отдающих устройств через направляющие крючки поступают на опорную пластину, покрытую сукном, которое очищает и создает необходимое натяжение нитей. Затем нити проходят через крючки автомата на обрыв или сход нитей и через направляющие ролики поступают к водилке. Водилка имеет возвратно-поступательное движение, которое создается эксцентриком. Благодаря такому движению водилки обеспечивается крестообразная намотка пряди на бобину (рис. 7.5)

Крестообразная намотка повышает устойчивость размеров формы бобины, исключает смещение витков, выравнивает натяжение нитей. На отечественных заводах преимущественно используются тростильные машины марки Т-120, Т-120М. Машина Т-120 выполнена шестиходовой, каждый ход может работать индивидуально или совместно с другими. От основного вала вращение через ременную передачу передается на валик и эксцентрик. Размеры и профиль эксцентрика определяют ход водилки и, соответственно, аксиальные размеры бобины (табл. 7.3). При этом машина имеет автомат для ее остановки при обрыве пряди или намотке бобины до заданного диаметра.

Т-120 позволяет производить трощение до 36 нитей при длине бобины 10...120 мм, диаметром – не более 154 мм, со скоростью – от 200...1000 м/мин в зависимости от вида волокна. Машины Т-120М выполняются двухходовыми, имеют модернизиро-

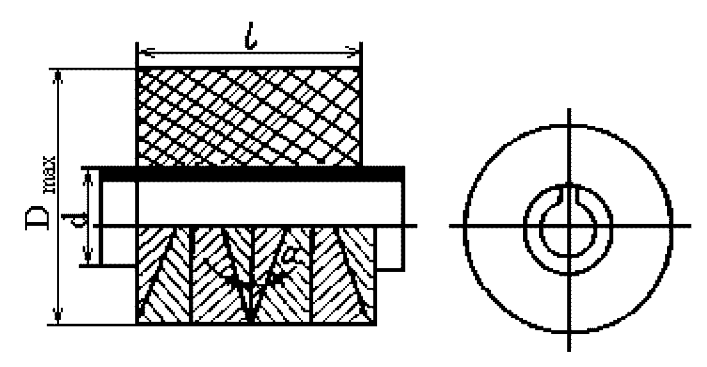


Рис. 7.5. Бобины пряжи с крестообразной намоткой

ванную систему регулировки натяжения нитей и обеспечивают выпуск более качественной продукции.

Таблица 7.3

Рекомендуемые размеры бобин и шаг намотки для различных волокнистых материалов

Вид волокна	Длина намотки, мм	Максимальный наружный диаметр бобины	Максимальный шаг намотки, мм
Натуральный шелк	30...90	80	30
Хлопчатобумажная пряжа	50...90	120	45
Капрон	30...90	80	30
Лавсан	30...90	80	30
Стекловолокно и стеклополиэфирное волокно:			
для обмотки проводов диаметром до 0,40 мм	35...40	70	25
для обмотки проводов диаметром до 0,41 и выше	40...50	110	30...50
для проводов прямоугольного сечения	50...80	120	80

Более современными являются автоматизированные тростильные машины фирмы Hacoba – двухходовые, с частотой вращения шпинделя 2000...6000 об/мин.

Глава 8
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЭМАЛИРОВАНИЯ И СТЕПЕНИ ЗАПЕЧКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬ-ПРОВОДОВ

8.1. Основные положения теплообмена

Эмалирование проволоки представляет собой нанесение жидкого лака на поверхность проволоки с последующей тепловой обработкой в эмаль-печи, в результате которой образуется изоляционное покрытие. Качество образующегося изоляционного покрытия зависит от физико-химических свойств лака, от качества поверхности эмалируемой проволоки и от правильности режимов наложения лака на проволоку с последующей тепловой обработкой.

Производительность технологического процесса эмалирования проволоки и качество получаемых проводов во многом определяются температурными режимами эмаль-печи.

Круглые эмалированные провода изготавливаются, как правило, в диапазоне диаметров от 0,05 до 2,5 мм, при этом минимальная толщина изоляции (на одну сторону) составляет в среднем, соответственно, от 0,005 до 0,035 мм (провода ПЭВ-2, ПЭТВ-2). Нанесение изоляции производится за 5–12 проходов через узел нанесения лака и печь для термообработки.

При нагревании провода с нанесенным на него слоем лака происходит вначале удаление растворителя, при котором расходуется энергия на его испарение. Эту энергию следует учитывать при расчёте нагревания провода, особенно, если диаметр провода меньше 0,1 мм.

Нагревание провода происходит как за счет поступления тепла при конвективном теплообмене с горячим воздухом $q_к$, так и при теплообмене лучеиспусканием со стен камеры печи $q_и$. Конвективный теплообмен – передача теплоты при движении жидкости или газа. Конвективный перенос теплоты всегда сопровождается теплопроводностью, поэтому одна из проблем, с которыми приходится сталкиваться при решении задач конвективного теплообмена, – проблема оценки влияния

каждого из двух механизмов передач теплоты. Определение вклада теплопроводности и конвекции в общий процесс теплообмена в значительной степени облегчает построение математической модели исследуемого процесса.

Конвективная теплоотдача – конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкостью. Расчет процесса теплоотдачи базируется на соотношении закона Ньютона–Рихмана:

$$dQ_с = \alpha(T_с - T_ж)dF, \qquad (8.1)$$

согласно которому тепловой поток $dQ_с$ от жидкости к элементу поверхности тела dF прямо пропорционален площади элемента dF и разности температур между поверхностью тела $T_с$ и температурой жидкости $T_ж$. Разность температур $\Delta T = T_с - T_ж$ называют температурным напором, а поверхность тела, через которую переносится теплота, – поверхностью теплообмена или теплоотдающей поверхностью.

Коэффициент пропорциональности a называется коэффициентом теплоотдачи (измеряется в Вт/(м^2·К)). Преобразуя соотношение (8.1), получаем:

$$\alpha = \frac{dQ_с}{(T_с - T_ж)dF} = \frac{q_с}{\Delta T}. \qquad (8.2)$$

Соотношение (8.2) позволяет определить коэффициент теплоотдачи как плотность теплового потока $q_с$ на границе жидкости (газа) и омываемого тела, отнесенную к разности температур поверхности этого тела и окружающей среды. Расчет конвективной теплопередачи связан с определением коэффициента теплопередачи.

Если учесть, что теплопередача от нагретого газа к проволоке в эмаль-печах происходит в условиях, близких к теплопередаче при свободном движении теплоносителя, то, используя критериальные уравнения подобия, можно получить выражение для коэффициента конвективной теплопередачи:

$$\alpha = \frac{1{,}18\lambda(g\beta\Delta t\,\mathrm{Pr})^{0{,}125}}{\mathrm{d}^{0{,}625}\nu^{0{,}25}}, \qquad (8.3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа; g – ускорение сводного падения; β – коэффициент объемного расширения газа; Δt – разность температур между проволокой и газом; ν – коэффициент кинематической вязкости газа; Pr – критерий Прандтля; d – диаметр провода.

Использование уравнения (8.3) для практических расчетов затруднительно, так как большинство величин, входящих в него, – перемен-

ные, зависящие от температуры воздуха (λ, β, ν, Pr) или от разности температур проволоки и воздуха (ΔT).

При эмалировании проволоки в широких пределах изменяются как температура воздуха, так и температура проволоки; кроме того, при решении ряда практических задач заранее неизвестны температура газа по длине печи, а также температура проволоки, которую необходимо знать для определения ΔT.

Задачу можно упростить, если ввести в уравнение новое обозначение

$$E = \frac{(g\beta\Delta t\,\mathrm{Pr})^{0,125}\lambda}{\nu^{0,25}}, \tag{8.4}$$

тогда

$$\alpha = \frac{1,18}{d^{0,625}}E. \tag{8.5}$$

Величина E является функцией температуры газа и проволоки.

Несмотря на изменение температуры воздуха и проволоки, в больших пределах величина E по высоте эмаль-печи изменяется не сильно и в среднем составляет 0,39, а при эмалировании полиэфирными лаками E = 0,41. Аналогичные расчеты при использовании полиуретановых лаков дают E = 0,38.

Таким образом, при различных тепловых режимах эмалирования величина E изменяется незначительно. В связи с этим для условий эмалирования проволоки можно принять среднее значение $E_{ср}$ = 0,39. С учетом $E_{ср}$ и уравнения (8.3) можно получить простую формулу для $\alpha_{ср}$:

$$\alpha_{ср} = \frac{0,47}{d^{0,625}},\ \text{ккал}/\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град}. \tag{8.6}$$

Расчеты по (8.6) дают погрешность по отношению к значениям, полученным по (8.3) в пределах ±6 %.

Необходимо подчеркнуть, что по (8.6) определяется среднее значение $\alpha_{ср}$ в процессе нагревания проволоки.

Сравнение значений $\alpha_{ср}$, получаемых по (8.6), с экспериментальными данными показывает, что расчетные и экспериментальные результаты достаточно близки.

Поступление тепла за счет конвекции определим по формуле

$$q_к = p\alpha_к(T_в - T_н), \tag{8.7}$$

где p – наружный периметр провода; $T_в$ – температура воздуха в камере печи; $\alpha_к$ – коэффициент конвективного теплообмена.

Поступление тепла за счет теплового излучения

$$q_{и} = p\alpha_{и}(T_{с} - T_{н}) = p\varphi_{п}\varepsilon_{п}C_{0}\theta(T_{с}^{4} - T_{п}^{4}), \quad (8.8)$$

где $\alpha_{и} = \varphi_{п}\varepsilon_{п}C_{0}\theta$; $T_{с}$ – температура стенок камеры печи; $C_{0} = 5{,}7\cdot10^{-8}$ Дж·м$^{-2}$·К$^{-4}$ – постоянная излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{п} = 0{,}05...0{,}1$ – коэффициент черноты поверхности чистых металлов; $\varepsilon_{п} = 0{,}8...0{,}9$ – для полимерных покрытий; $\varphi_{п} = 0{,}8...0{,}9$ – угловой коэффициент облученности провода.

Если $d > 0{,}1$ мм, то в печах без принудительной конвекции газов (старые конструкции) скорость газов невелика и для расчета коэффициента $\alpha_{к}$ используют формулы (8.7). При свободной конвекции

$$\alpha_{к} = 0{,}47d^{-0{,}625}. \quad (8.9)$$

При скорости движения воздуха более 0,5 м/с в печах с принудительной циркуляцией газов применяют формулу

$$\alpha_{к} = 1{,}43\upsilon_{в}^{0{,}41}d^{-0{,}59}, \quad (8.10)$$

где $\upsilon_{в}$ – скорость воздуха, м/с. В камере печей эмаль-агрегатов горячий воздух движется со значительной скоростью (от 0,2 до 5 м/с), поэтому разность температур воздуха и нагретых внутренних стенок печи может достигать нескольких десятков градусов. Для измерения температуры воздуха в печи протягивают термопару и определяют некоторую эффективную температуру термопарного датчика, отличающуюся от температуры воздуха в печи.

Если в камеру печи поместить неподвижную термопару то,

$$\alpha_{к}(T_{в} - T_{т}) + \alpha_{и}(T_{с} - T_{т}) = 0, \quad (8.11)$$

где $T_{т}$ – температура термопары; $\alpha_{к}$ и $\alpha_{и}$ – коэффициенты теплопередачи конвекцией и излучением для термопары.

В соответствии с уравнением (8.11) температура термопары $T_{т}$ находится в промежутке между температурой воздуха $T_{в}$ и температурой стенок $T_{с}$. Коэффициент излучательного теплообмена $\alpha_{и}$ можно рассчитать также по уравнению (8.11) при известных остальных параметрах $\alpha_{к}$, $T_{с}$, $T_{т}$, $T_{в}$.

Для повышения скорости эмалирования увеличивают интенсивность нагревания провода. Для этого стремятся поддерживать максимальную температуру по всей камере печи и увеличивать коэффициент теплообмена $\alpha_{к}$ повышением скорости циркуляции горячих газов в камере печи. Однако при очень высокой температуре возможно воспла-

менение паров растворителя и лака на проводе, особенно в момент обрыва провода и остановках по другим причинам. Кроме того, при высокой температуре прочность металла уменьшается и увеличивается обрывность провода. Обычно температура в камере не превышает 500...550 °С, а скорость газов находится в пределах 2...8 м/с.

Тепловой баланс для провода может быть записан в виде уравнения:

$$q_{\text{м}} + q_{\text{э}} + q_{\text{р}} = q_{\text{м}} + q_{\text{к}}, \tag{8.12}$$

где $q_{\text{м}}$, $q_{\text{э}}$, $q_{\text{р}}$ – расход тепловой энергии на нагревание металла провода, слоя эмали и удаление растворителя.

Расход энергии на нагревание металла провода и эмали на единицу длины провода составляет:

$$q_{\text{э}} + q_{\text{м}} = (C_{\text{э}} + C_{\text{м}})\frac{dT_{\text{п}}}{dt} = k_{\text{э}}C_{\text{м}}\frac{dT_{\text{п}}}{dt}, \tag{8.13}$$

расход энергии на удаление растворителя:

$$q_{\text{р}} = -r_{\text{м}}\frac{dG_{\rho}}{dt} = -r_{\text{и}}\rho_{\text{э}}S_{\text{э}}\frac{dW}{dt}, \tag{8.14}$$

где $T_{\text{п}}$ – температура провода.

Расход тепловой энергии на нагревание эмалевой пленки до температуры кипения растворителя $T_{\text{к}}$ и его испарение на единицу длины провода равен:

$$q_{\text{э}} = m_{\text{э}}c_{\text{э}}T_{\text{к}} + m_{\text{р}}r_{\text{и}} = m_{\text{э}}(c_{\text{э}}T_{\text{к}} + xr_{\text{и}}). \tag{8.15}$$

Определим расход тепловой энергии на нагревание металла провода и эмалевой пленки на единицу его длины:

$$q_{\text{м}} = m_{\text{м}}c_{\text{м}}\Delta T_{\text{м}} = \frac{\pi}{4}d^2{}_{\text{м}}\rho_{\text{м}}c_{\text{м}}\Delta T_{\text{м}}, \tag{8.16}$$

$$q_{\text{э1}} = m_{\text{э}}\,c_{\text{э}}S_{\text{э}}, \tag{8.17}$$

где $S_{\text{м}}$ и $S_{\text{э}}$ – сечение металла и эмали; $c_{\text{м}}$ и $c_{\text{э}}$ – их удельные теплоемкости; W, x – соответственно масса растворителя и его доля, содержащаяся в эмали; $S_{\text{э}}$ – сечение слоя эмали, наносимого за один проход; $\rho_{\text{э}}$ – плотность эмали; $r_{\text{и}}$ – удельная теплота испарения растворителя из лака.

Если бы температура в течи поддерживалась постоянной и наибольшей по всей длине зоны нагревания, тогда $T_{\text{т}}$ в уравнении (8.11) не зависела бы от длины печи. При этих условиях это уравнение примет вид

$$T_п = T_т - (T_т - T_н)e^{\mu t}, \tag{8.18}$$

где $T_н$ – начальная температура провода при входе его в печь; t – время нахождения провода при постоянной температуре $T_п$; $1/\mu = \tau$ – постоянная времени нагрева провода.

Для провода прямоугольной формы

$$\mu = \frac{\alpha P}{k c_м S_м \rho_м}. \tag{8.19}$$

Для проводов круглого сечения

$$\mu = \frac{4\alpha}{k c_м d \rho_м}, \tag{8.20}$$

где $\alpha = \alpha_к + \alpha_и$; $k = 1$ безразмерный коэффициент.

По мере нагревания провода его температура достигнет базовой температуры $T_б$, при $X = L_1$ (рис. 8.1) в области изменения x от 0 до L_1 удаляется растворитель. При дальнейшем нагревании провода на участке от $x = L_1$ до $x = L$ (L – полная длина печи) происходит процесс пленкообразования. В конце нагревания, при $x = L$, температура провода максимальна, $T_п = T_м$.

Поскольку температура воздуха по длине печи на практике распределена неравномерно, следовательно, уравнение (8.15) дает возможность рассчитать лишь приближенное значение температуры провода на каждом участке печи. Наибольшая разница между температурой провода и ее расчетным значением будет иметь место на начальном участке нагрева.

В литературе известен метод расчета температуры провода и средней скорости его нагрева исходя из степени завершенности процесса запечки [2]. При линейном законе изменения температуры в областях испарения растворителя и пленкообразования определяется полное время пребывания провода в печи $t = L/\upsilon$ и скорость эмалирования υ:

$$\upsilon = L\mu / ((T_т - T_н) / (T_т - T_м)). \tag{8.21}$$

Приведенное уравнение дает заниженное значение скорости эмалирования, что обусловлено, в основном, заниженным значением $T_б$.

8.2. Определение температурного режима печи эмаль-агрегата HN горизонтального типа

Для определения температурного режима эмалирования провода ПЭФД-2-200 использовалась термопара длиной 6 м и милливольтметр марки Ф-266. Термопара привязывалась к заправочному проводу и пропускалась в печь. Фиксация температуры производилась через каждые полметра печи, при неподвижной термопаре, после достижения установившегося значения показаний термопарного прибора. Для исключения излучательного теплообмена термопара помещалась в металлический экран.

Измерения проводились на всех проходах. Данные, полученные по этим измерениям, показали идентичность значений. Расхождение составляло 2...5 °С, что в пределах допустимой погрешности измерений. Экспериментальные данные для 1-го и 2-го проходов приведены в табл. 8.1, а распределение температуры воздуха по длине печи HN – на рис. 8.1.

Таблица 8.1

Распределение температуры воздуха по длине печи

L	м	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	5,8
$T_в$	°С	44	280	445	485	502	515	525	535	549	555	486	283	149

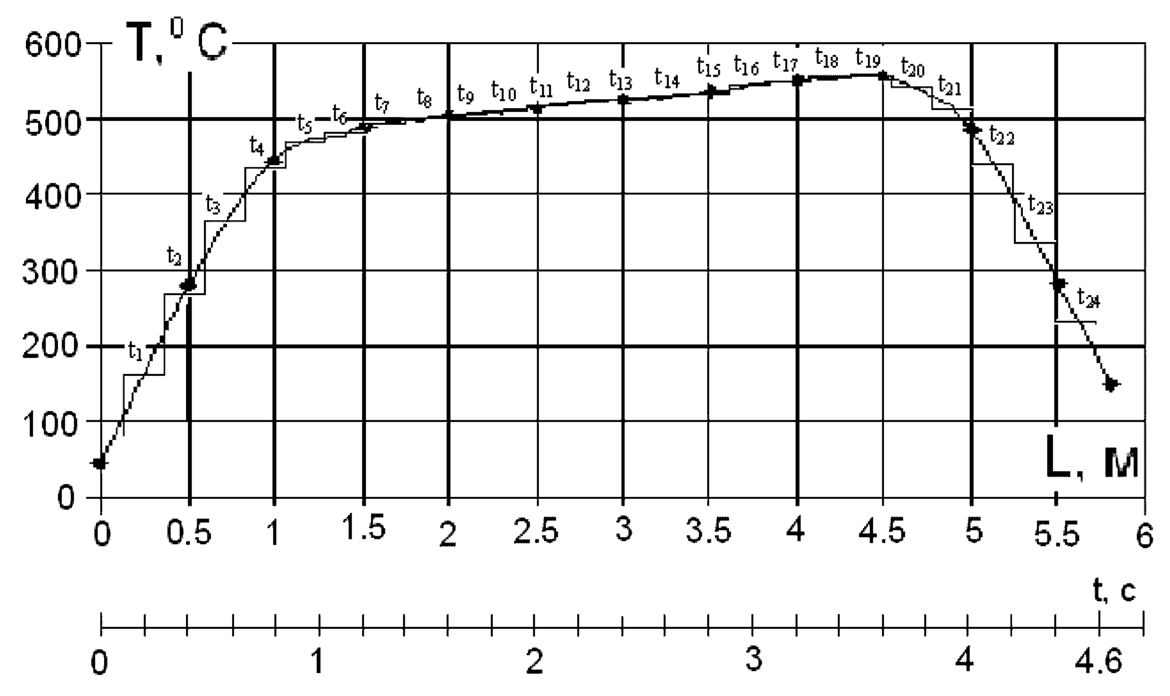


Рис. 8.1. Распределение температуры воздуха $T_в$, °С, по длине печи HN (стационарный режим измерений)

Из рис. 8.1 следует, что температура воздуха в печи эмаль-агрегата HN резко повышается в зоне испарения растворителя (первая зона). Первая зона составляет примерно 1 м, и температура в этой зоне повышается от 40 до 450 °С. Во второй зоне, где идут завершающие процессы пленкообразования, температура повышается незначительно (от 450 до 560 °С) по сравнению с зоной испарения растворителя. Длина второй зоны примерно 4,5 м. Далее идет третья зона – зона охлаждения.

Для определения коэффициента излучения необходимо знать температуры $T_в$, $T_с$, $T_т$. Исходя из кривой распределения температуры воздуха по длине печи, принимаем ее среднее значение в области пленкообразования, $T_в = 500$ °С (рис. 8.1). Температура стенок печи $T_с = 550$ °С задается технологическим режимом эмалирования данного провода и контролируется датчиком температуры, установленным в конце зоны пленкообразования. За температуру термопары принимаем среднее значение между температурой стенок печи и температурой воздуха $T_т = 525$ °С. Начальная температура провода $T_т = 25$ °С, т. е. равна температуре воздуха в цехе.

Расчет температуры провода проводим по формуле (8.18):

$$T_п = T_т - (T_т - T_н)e^{\mu t},$$

где $T_т$ – температура термопары (в нашем случае она равна температуре воздуха в печи), °С; $T_н$ – начальная температура (равна температуре цеха), °С; μ – коэффициент скорости нагрева провода, зависящий от суммарного теплоизлучения, удельной теплоемкости материала провода, диаметра эмалируемого провода; t – время нахождения провода на участке печи при постоянной температуре среды $T_в$, с.

Формула (8.18) справедлива для стационарного режима, то есть когда температура воздуха в печи постоянна и не изменяется по всей длине, а начальная температура провода равна температуре цеха. Следовательно, если разбить кривую распределения температуры воздуха на ряд ступеней, можно считать режим нагревания провода стационарным в пределах каждой ступени и тогда уравнение (8.18) применимо для расчета температуры провода на каждой ступени.

В нашем случае, температуру термопары заменяем средней температурой воздуха на каждой ступени. Температуру провода в начале каждой ступени принимаем равной температуре провода в конце предыдущего участка. В этом случае уравнение (8.18) будет соответствовать допущениям, принятым в литературе, и может быть использовано для расчета температуры провода на каждом участке.

8.3. Определение тепловых параметров эмалирования провода ПЭФД-2-200 диаметром 0,56 мм

Определяем коэффициент конвективного теплообмена по формуле (8.12):

$$\alpha_к = 1,43 v_в^{0,41} d^{-0,59},$$

где $v_в$=1 м/с – скорость движения воздуха в печи; d = 0,56 – диаметр эмалируемой проволоки, мм; тогда

$$\alpha_к = 1,43 \cdot 1^{0,41} \cdot (0,56 \cdot 10^{-3})^{-0,59} = 119 \ \text{Вт/м}^2 \cdot °\text{С}.$$

Определяем коэффициент излучения исходя из формулы (8.11) для стационарного режима:

$$\alpha_к (T_в - T_т) + \alpha_{из} (T_с - T_т) = 0;$$

$$\alpha_{из} = \frac{-\alpha_к (T_в - T_т)}{(T_с - T_т)} = \frac{119 \cdot (500 - 525)}{(550 - 525)} = 119 \ \text{Вт/м}^2 \cdot °\text{С}.$$

Находим постоянную скорости нагрева провода μ по уравнению (8.20):

$$\mu^1 = \frac{4(\alpha_к + \alpha_{из})}{k c_м d} = \frac{4 \cdot (119 + 119)}{1 \cdot 395 \cdot 0,56 \cdot 10^{-3}} = 3070 \ \text{кг/с} \cdot \text{м}^3,$$

где $c_м$ = 395 Дж/кг·°С – удельная теплоемкость меди; κ = 1 – безразмерный коэффициент; d = 0,56 мм – диаметр провода.

$$\mu = \frac{\mu^1}{\rho_м} = \frac{3070}{8600} = 0,4 \ \text{с}^{-1},$$

где $\rho_м$ = 8600 кг/м^3 – плотность меди.

Постоянная времени нагрева провода диаметром 0,56 мм равна:

$$\tau = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \ с.$$

Определим количество теплоты для нагрева 1 м медного провода до температуры T_{max} = 525 °С:

$$q_м = c_м m_м (T_{max} - T_н) = c_м \rho_м \pi R^2 l (T_{max} - T_н) =$$

$$= 395 \cdot 8600 \cdot 3,14 \cdot (0,28 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot (525 - 25) = 395 \ \text{Дж},$$

где $m_м$ – масса 1 м провода, кг.

Определим количество тепла для нагрева 1 м эмаль-пленки до температуры T_{max} = 525 °C [19]:

$$q_э = c_э m_э (T_{max} - T_н) = c_э \rho_э 2\pi R l \Delta =$$
$$= 1300 \cdot 1200 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot (525 - 25) = 14{,}3 \text{ Дж},$$

где $m_э$ – масса эмали на длине провода 1 м, кг; $\rho_э$, $c_э$ – плотность и удельная теплоемкость эмали; Δ – односторонняя толщина эмали.

Определим количество теплоты для испарения растворителя на длине провода 1 м:

$$q_р^1 = m_р q_{исп} = \rho_р S l q_{исп} = \rho_р \pi d \Delta l q_{исп} =$$
$$= 800 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}56 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 345 = 4{,}83 \text{ Дж},$$

где m – масса растворителя на 1 метре провода, кг; $\rho_р$ – плотность растворителя (ксилол); $q_{исп}$ – удельная теплота испарения растворителя. Однако в реальных условиях в эмальпленке содержится от 30 до 40 % растворителя, тогда

$$q_р = 30...40~\%;\ q_р' = 0{,}4 \cdot 4{,}83 = 1{,}9 \text{ Дж}.$$

В табл. 8.2 приведены расчетные данные по теплофизическим свойствам для проводов диаметров 056 и 0,4 мм.

Таблица 8.2

Теплофизические свойства эмалируемого провода

Название параметра	Значение параметра, для диаметра провода	
	0,56 мм	0,4 мм
Коэффициент конвективной теплопередачи, $Вт/м^2 \cdot °C$	119	144
Коэффициент излучения, $Вт/м^2 \cdot °C$	119	144
Постоянная скорости нагрева провода μ, $с^{-1}$	0,4	0,85
Количество тепла, необходимого для нагрева 1 м провода, Дж	395	217
Количество тепла, необходимого для нагрева эмали на 1 м провода, Дж	14,3	10,4
Количество тепла, необходимого для испарения растворителя, Дж	1,9	1,3

8.4. Расчет температуры провода диаметром 0,4 мм по длине печи HN для различных скоростей эмалирования

Расчет распределения температуры провода диаметром 0,4 мм по длине прохода печи проводим по формуле 8.18. Разбиваем кривую распределения температуры воздуха в печи на временные интервалы (рис. 8.2) и производим расчет температуры провода по участкам для скорости эмалирования 75 м/мин. Формула (8.18) справедлива для стационарного режима, то есть когда температура воздуха в печи имеет постоянное значение и не изменяется по всей длине. Однако в реальных условиях температура воздуха в печи непостоянна и имеет нелинейный характер распределения (рис. 8.2). В отличие от методики Холодного [2], для повышения точности при расчете температуры провода мы разбиваем кривую распределения температуры воздуха на участки длительностью 0,2 с. То есть кривую заменяем ступенчатым распределением (рис. 8.2), и на каждом участке находим среднее значение температуры воздуха $T_т$. Тогда начальная температура провода при входе на следующий участок $T_н$ будет равна температуре провода в конце предыдущего участка. При скорости эмалирования 75 м/мин элементарный участок провода проходит печь за 4,68 с. Разбиваем кривую на участки длительностью 0,2 с (рис. 8.2) и для каждого участка рассчитываем температуру провода на выходе с этого участка по выражению (8.18).

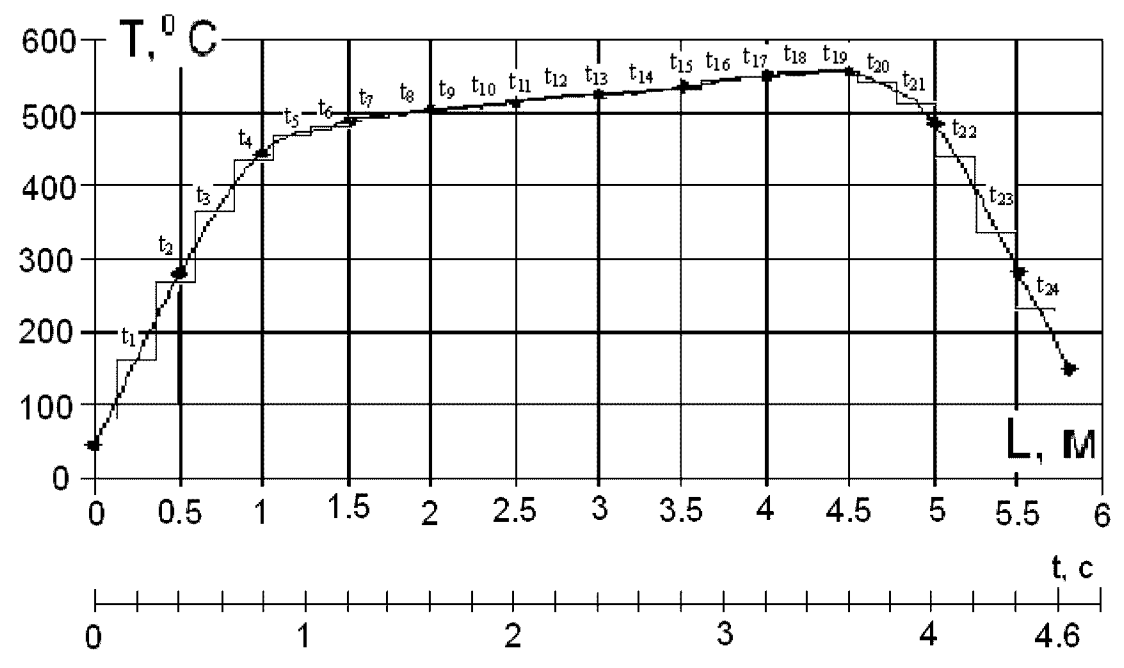


Рис. 8.2. Ступенчатое распределение температуры воздуха по длине и времени нахождения в печи эмаль-агрегата HN (скорость эмалирования 75 м/мин)

Для начального участка нагрева провода (t_0) на длине 0...25 см исходными данными являются:

$$t_0 = 0...0{,}2\text{ с},\ T_т = 40\ °\text{C},\ T_н = 22\ °\text{C},\ \mu = 0{,}85\ \text{с}^{-1},\ \text{тогда}$$

$$T_п = T_т - (T_т - T_н)e^{-\mu t} = 40 - (40 - 22)\cdot e^{-0{,}85\cdot 0{,}2} = 25\ °\text{C}.$$

Для первого (t_1) участка:

$$t_1 = 0{,}2...0{,}4\text{ с},\ T_т = 178\ °\text{C},\ T_н = 25\ °\text{C},\ \mu = 0{,}85\ \text{с}^{-1},\ \text{тогда}$$

$$T_п = T_т - (T_т - T_н)e^{-\mu t} = 178 - (178 - 25)e^{-0{,}85\cdot 0{,}2} = 48\ °\text{C}.$$

Для второго (t_2) участка:

$$t_2 = 0{,}4...0{,}6\text{ с},\ T_т = 281\ °\text{C},\ T_н = 48\ °\text{C},\ \mu = 0{,}85\ \text{с}^{-1},\ \text{тогда}$$

$$T_п = T_т - (T_т - T_н)e^{-\mu t} = 281 - (281 - 48)e^{-0{,}85\cdot 0{,}2} = 84\ °\text{C}.$$

Для третьего (t_3) участка:

$$T_п = T_т - (T_т - T_н)e^{-\mu t} = 373 - (373 - 84)e^{-0{,}85\cdot 0{,}2} = 129\ °\text{C}.$$

Результаты расчетов $T_{пр}$ для скоростей эмалирования 75 и 84 м/мин представлены для всех последующих участков в табл. 8.3. Аналогично разбиваем кривую распределения температуры воздуха в печи на временные интервалы и производим расчеты, указанные выше для любых скоростей эмалирования.

На рис. 8.3. приведены зависимости температуры провода ПЭФД-2-200 диаметром 0,4 мм по длине печи эмаль-агрегата HN для различных скоростей эмалирования.

На основе расчетных данных построены зависимости максимальной температуры провода от скорости эмалирования для проводов диаметром 0,56 и 0,4 мм.

Из рис. 8.3 следует, что с увеличением скорость эмалирования провод медленнее нагревается и уменьшается его максимальная температура. Это связано с тем, что чем выше скорость эмалирования, тем меньшее время он находится в печи, подвергаясь меньшим температурным нагрузкам. При маленькой скорости эмалирования провод будет слишком долго находиться в печи, и его изоляция быстро состариться, так как в печи действуют высокие температуры. Однако при слишком большой скорости эмалирования провод не будет успевать достаточно нагреваться, скорость химической реакции замедлится и, следовательно, уменьшится степень завершенности процесса структурирования эмалевого покрытия. В обоих случаях провод не будет удовлетворять необходимым требованиям. Нуж-

но выбирать такую скорость эмалирования, при которой провод выдерживал бы все предусматриваемые испытания на изделие и обеспечивал рациональное использование материалов и электроэнергии.

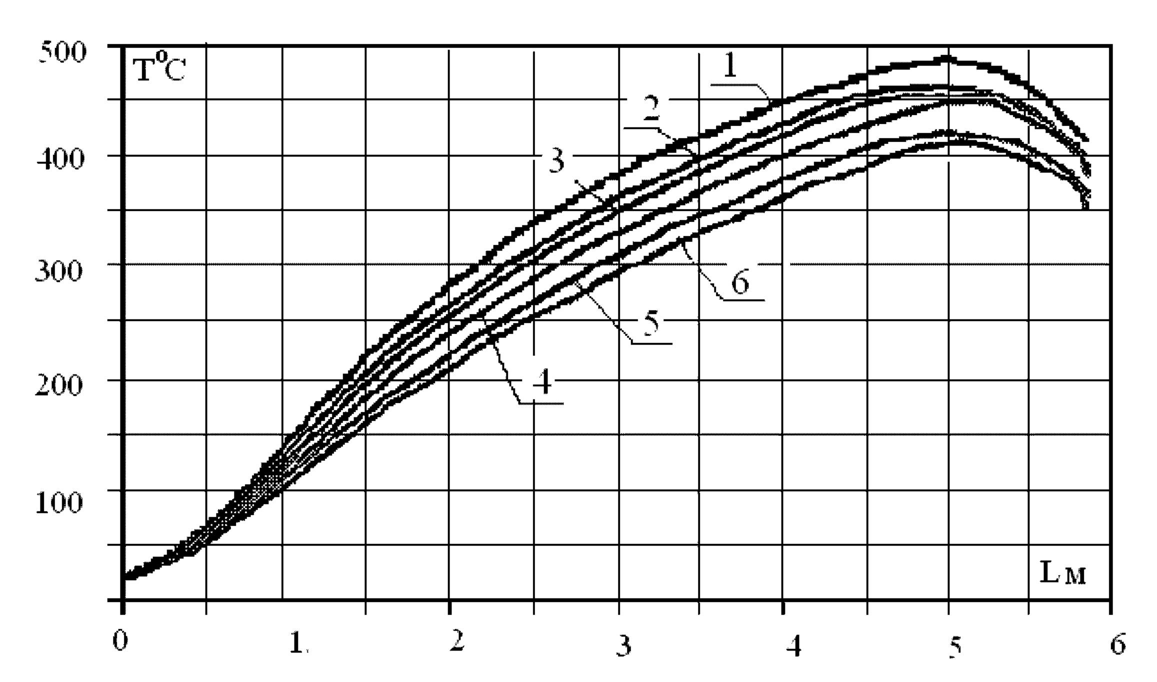


Рис. 8.3. Распределение температуры провода диаметром 0,4 мм по длине печи HN при различных скоростях эмалирования, м/мин:
1 – 75; 2 – 84; 3 – 90; 4 – 96; 5 – 102; 6 – 108

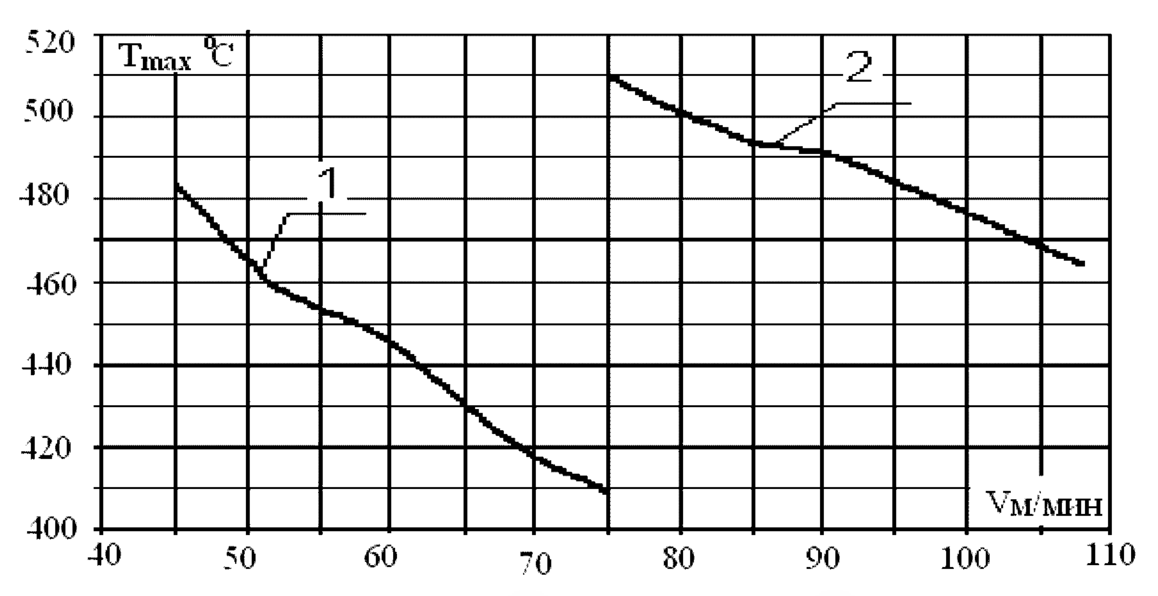


Рис. 8.4. Зависимость максимальной температуры провода от скорости эмалирования для различных диаметров, мм:
1 – 0,56; 2 – 0,4

Таблица 8.3

Распределение температуры провода диаметром 0,4 мм по длине печи

75 м/мин				84 м/мин			
L, м	t, с	$T_в$, °С	$T_{пр}$, °С	L, м	t, с	$T_в$, °С	$T_{пр}$, °С
0	0	40	25	0	0	40	24
0,25	0,2	178	48	0,28	0,2	176	48
0,5	0,4	281	84	0,56	0,4	304	88
0,75	0,6	373	129	0,84	0,6	406	138
1	0,8	443	178	1,12	0,8	463	189
1,25	1	471	223	1,4	1	479	234
1,5	1,2	488	264	1,68	1,2	493	274
1,75	1,4	497	300	1,96	1,4	500	309
2	1,6	499	331	2,24	1,6	508	340
2,25	1,8	511	359	2,52	1,8	516	368
2,5	2	518	388	2,8	2	519	392
2,75	2,2	520	409	3,08	2,2	527	413
3	2,4	525	427	3,36	2,4	532	432
3,25	2,6	530	443	3,64	2,6	540	449
3,5	2,8	537	458	3,92	2,8	553	465
3,75	3	544	471	4,2	3	558	480
4	3,2	551	484	4,48	3,2	550	491
4,25	3,4	558	496	4,76	3,4	519	495
4,5	3,6	558	506	5,04	3,6	440	486
4,75	3,8	534	510	5,32	3,8	320	460
5	4	490	507	5,85	4,18	119	380
5,25	4,2	389	489	–	–	–	–
5,5	4,4	267	454	–	–	–	–
5,75	4,6	143	405	–	–	–	–
5,85	4,68	110	359	–	–	–	–

8.5. Расчет степени запечки изоляции эмаль-проводов с использованием уравнения кинетики химической реакции

8.5.1. Расчет степени запечки изоляции провода ПЭФД-2-200 диаметром 0,56 мм при скорости эмалирования 45 м/мин

Для определения степени запечки изоляции эмалированного провода необходимо знать распределение его температуры по длине прохода печи или по времени пребывания в ней. В качестве примера в табл. 6.4 приведены значения температуры провода ($T_{пр}$) ПЭФД-2-200

диаметром 0,56 мм, при скорости эмалирования 45 м/мин, от времени пребывания в печи. Элементарный участок провода проходит всю длину печи за 7,8 с.

Таблица 8.4

Зависимость температуры провода диаметром 0,56 мм от времени нахождения в печи при скорости эмалирования 45 м/мин

Время нахождения в печи	Температура провода
t, с	$T_{ПР}$, °С
0	22
0,5	49
1	100
1,5	162
2	219
2,5	270
3	313
3,5	351
4	383
4,5	410
5	432
5,5	453
6	472
6,5	483
7	479
7,5	446
7,8	412

По данным табл. 8.4 построена зависимость температуры провода от времени нахождения его в печи (рис. 8.5).

Степень запечки β рассчитывается из уравнения реакции первого порядка:

$$\beta = \frac{C_t}{C_0} = 1 - e^{\frac{-t}{\tau}}, \qquad (8.22)$$

где t – время запечки; τ – постоянная времени химической реакции при температуре ступени $T_{пр}$, K; C_0 – первоначальная концентрация продукта реакции; C_t – концентрация продукта поликонденсации к моменту времени t при постоянной температуре ступени $T_{пр}$, K.

Для того чтобы воспользоваться уравнением (8.22) для нахождения степени запечки, необходимо рассчитать постоянную времени химической реакции τ, которая убывает с ростом температуры согласно уравнению Аррениуса

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{E_A}{RT}}, \tag{8.23}$$

где τ_0 – const = $2 \cdot 10^{-14}$ с; R = 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная постоянная; E_A = 200 кДж = 200 000 Дж/моль – энергия активации химической реакции поликонденсации, когда реакция идет по гидроксильным группам ОН с образованием пространственной сетки.

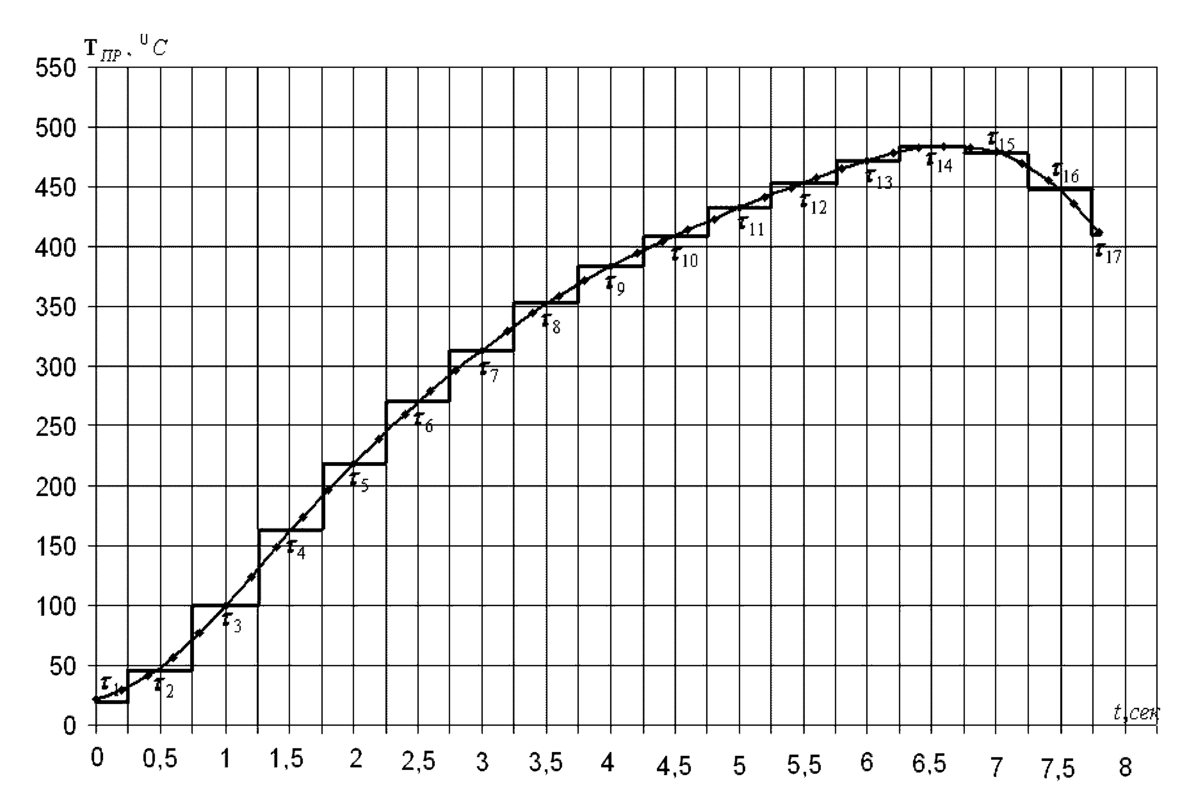


Рис. 8.5. Зависимость температуры провода ∅ 0,56 мм от времени нахождения в печи при м/мин

Для расчета степени запечки изоляции эмалируемого провода необходимо выполнить следующие условия:

1. Разбить нелинейную зависимость температуры провода от времени нахождения в печи на интервалы длительностью 0,3...0,5 секунды и заменить плавную кривую нагрева провода на ступенчатую. В пределах каждой ступени средняя температура провода $T_{пр}$ остается постоянной (рис. 8.5). Чем меньше длина ступени, тем точнее будут расчеты степени запечки изоляции провода.
2. Для каждой ступени температуры рассчитать постоянную времени химической реакции τ исходя из температуры провода $T_{пр}$ на данном участке.

Пример расчета постоянной времени химической реакции τ:

при $T = 22\ ^\circ\mathrm{C} = 295\ \mathrm{K}\ \ \tau_1 = \tau_0 e^{\frac{E_A}{RT}} = 2\cdot10^{-14}\cdot e^{\frac{200000}{8{,}31\cdot295}} = 5{,}4034\cdot10^{21}$ с;

при $T = 410\ ^\circ\mathrm{C} = 683\ \mathrm{K}\ \ \tau_1 = \tau_0 e^{\frac{E_A}{RT}} = 2\cdot10^{-12}\cdot e^{\frac{200000}{8{,}31\cdot683}} = 40{,}234$ с.

Расчетные данные постоянной времени химической реакции для каждой ступени температуры провода сведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Расчет постоянной времени химической реакции

Время нахождения в печи t, с	Температура провода $T_{пр}$, °С	Температура провода $T_{пр}$, К	Постоянная времени реакции τ, с
0	22	295	τ_1 = 5,4034E + 21
0,5	49	322	τ_2 = 5,7769E + 18
1	100	373	τ_3 = 2,1056E + 14
1,5	162	435	τ_4 = 2,1349 E + 10
2	219	492	τ_5 = 35124609,29
2,5	270	543	τ_6 = 355029,1951
3	313	586	τ_7 = 13733,38542
3,5	351	624	τ_8 = 1126,070067
4	383	656	τ_9 = 171,5797874
4,5	410	683	τ_{10} = 40,2340576
5	432	705	τ_{11} = 13,3978716
5,5	453	726	τ_{12} = 4,99096363
6	472	745	τ_{13} = 2,14293331
6,5	483	756	τ_{14} = 1,33927189
7	479	752	τ_{15} = 1,58639177
7,5	446	719	τ_{16} = 6,89209755
7,8	412	685	τ_{17} = 36,3004405

3. После определения постоянной времени химической реакции для каждой температурной ступени исключаем те постоянные времени (при низких температурах), которые имеют значения $\tau >> t$, полагая, при этом, что скорость химической реакции при выполнении данного условия близка к нулю. Начинаем расчеты степени запечки β с тех значений постоянных времени химической реакции, при которых $\tau \approx 100t$ (такими являются участки с 9 по 17), этим самым мы задаем погрешность β на уровне 1 %. Для каждой из ступеней нагрева от τ_9 до τ_{17} рассчитываем значения β (табл. 8.6).

Пример расчета зависимости степени запечки изоляции эмалированных проводов от времени пребывания в печи при постоянной температуре

Уравнение (8.22) для расчета β содержит две переменные величины: t – текущее время пребывания провода в печи и τ – постоянную времени химической реакции. Поскольку температура провода по длине печи непрерывно изменяется, то зависимость постоянной времени от t имеет достаточно сложный характер, что в значительной степени затрудняет применение этого уравнения. Для упрощенного решения поставленной задачи используем следующий прием.

Для каждой ступени с постоянной температурой провода (рис. 8.5, табл. 8.6) рассчитываем степень запечки изоляции исходя из времени пребывания ее при данной $T_{пр}$, начиная с момента входа и до выхода из печи.

По полученным расчетным данным строим зависимость степени запечки от времени нахождения провода в печи при различных постоянных значениях температуры провода на каждой ступени и соответствующих им значениям постоянных времени химической реакции τ (рис. 8.7). По этой зависимости можно определить максимальную степень запечки изоляции на выходе из печи.

Для каждой ступени с постоянной температурой провода находим степень запечки (табл. 8.6.).

Максимальная степень запечки изоляции при $T_{пр}$ = 20 °С равна:

$$\tau_1 = 5{,}4034\cdot10^{21}\text{ с},\ t = 7{,}8\text{ с, тогда } \beta_1 = 1 - e^{\frac{-t}{\tau}} = 1 - e^{\frac{-7{,}8}{5{,}4034\cdot10^{21}}} = 0.$$

Максимальная степень запечки изоляции при $T_{пр}$ = 351 °С (восьмая ступень) равна:

$$\tau_8 = 1126{,}07\text{ с},\ t = 7{,}8\text{ с, тогда } \beta_8 = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - e^{-\frac{7{,}8}{1126{,}07}} = 6{,}90\cdot10^{-3}.$$

Максимальная степень запечки изоляции при Т $_{пр}$ =483 °С (четырнадцатая ступень) равна:

$$\tau_{14} = 1{,}33927\text{ с},\ t = 7{,}8\text{ с, тогда } \beta_{14} = 1 - e^{\frac{-t}{\tau}} = 1 - e^{\frac{-7{,}8}{1{,}33927}} = 0{,}997;$$

промежуточное значение $\beta_{14.4}$ четырнадцатой ступени для времени запечки t = 4 с при τ_{14} = 1,33927 с равно:

$$\beta_{14,4} = 1 - e^{\frac{-t}{\tau}} = 1 - e^{-\frac{4}{1{,}33927}} = 0{,}9495.$$

Расчетные данные степени запечки β для каждой температурной ступени от времени нахождения провода в печи сведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Расчетные зависимости $\beta = \varphi(t)$ для каждой температурной ступени

	τ_9 = 171,57 с $T_{пр}$ = 656 K	τ_{10} = 40,23 с $T_{пр}$ = 683 K	τ_{11} = 13,398 с $T_{пр}$ = 705 K	τ_{12} = 4,99 с $T_{пр}$ = 726 K	τ_{13} = 2,143 с $T_{пр}$ = 745 K
t, с	β	β	β	β	β
0	0	0	0	0	0
0,5	0,00291	0,01235	0,036632	0,095326	0,208104
1	0,005811	0,024548	0,071921	0,181566	0,372901
1,5	0,008704	0,036595	0,105918	0,259584	0,503402
2	0,011589	0,048494	0,13867	0,330165	0,606746
2,5	0,014465	0,060245	0,170222	0,394018	0,688584
3	0,017333	0,071852	0,200618	0,451784	0,753391
3,5	0,020192	0,083315	0,2299	0,504044	0,804711
4	0,023043	0,094636	0,25811	0,551321	0,845351
4,5	0,025886	0,105818	0,285287	0,594092	0,877534
5	0,02872	0,116861	0,311468	0,632786	0,90302
5,5	0,031547	0,127768	0,33669	0,667791	0,923202
6	0,034365	0,138541	0,360988	0,699459	0,939184
6,5	0,037175	0,14918	0,384396	0,728109	0,95184
7	0,039976	0,159688	0,406947	0,754027	0,961862
7,5	0,04277	0,170066	0,428671	0,777475	0,969799
7,8	0,044442	0,176231	0,441322	0,790457	0,973744

	τ_{14} = 1,339 с $T_{пр}$ = 756 K	τ_{15} = 1,586 с $T_{пр}$ = 752 K	τ_{16} = 6,892 с $T_{пр}$ = 719 K	τ_{17} = 36,3 с $T_{пр}$ = 685 K
t, с	β	β	β	β
0	0	0	0	0
0,5	0,311567	0,270343	0,069978	0,01368
1	0,52606	0,467601	0,135059	0,027172
1,5	0,673724	0,611531	0,195585	0,04048
2	0,775381	0,716551	0,251877	0,053605
2,5	0,845365	0,793179	0,304229	0,066552
3	0,893544	0,849092	0,352917	0,079321
3,5	0,926712	0,889889	0,398199	0,091915
4	0,949546	0,919657	0,440311	0,104337
4,5	0,965266	0,941377	0,479477	0,11659
5	0,976088	0,957225	0,515902	0,128674
5,5	0,983538	0,968789	0,549778	0,140594
6	0,988667	0,977227	0,581284	0,15235
6,5	0,992198	0,983383	0,610585	0,163945
7	0,994629	0,987876	0,637835	0,175382
7,5	0,996302	0,991153	0,663179	0,186662
7,8	0,997044	0,992678	0,677525	0,193356

По данным табл. 8.6 строим зависимости степени запечки изоляции провода от времени нахождения его в печи для каждой температурной ступени от τ_9 до τ_{16}, полагая, что по всей длине печи провод имеет постоянную температуру, равную среднему значению температуры ступени, а время его пребывания в печи определяется скоростью эмалирования (рис. 8.6–8.7).

8.5.2. Расчет степени запечки изоляции при первом проходе провода

Расчет степени запечки изоляции провода заключается в последовательном определении степени завершенности химической реакции на каждой температурной ступени по всей длине прохода печи. Последовательность расчета β в увеличенном масштабе схематично представлена на рис. 8.6. Сначала определяем ту температурную ступень, на которой максимальная степень запечки на выходе из печи не превышала бы 0,005...0,01. В приведенном выше примере этому условию удовлетворяет восьмая ступень температуры. Максимальная степень запечки на выходе из печи при $T_{пр}$ = 351 °С, как показано в предыдущем разделе, $\beta_8 = 6{,}90 \cdot 10^{-3}$. Поскольку провод непрерывно движется в печи и к моменту времени t = 3,75 с (8-й участок) его температура достигает величины $T_{пр}$ = 351 °С, рассчитаем степень запечки изоляции провода в конце 8-го участка (точка А рис. 8.6):

$$\beta_8 = 1 - e^{\frac{-3{,}75}{1126{,}07}} = 0{,}0033.$$

Считаем, что эмаль-лак с этой степенью запечки приходит на начало 9-го участка (точка В рис. 8.6).

После этого определяем время, за которое β_8 была бы достигнута при более высокой температуре на следующей 9-й ступени ($T_{пр}$ = 383 °С) (рис. 8.6), полагая, что при входе в печь провод уже имеет эту температуру, т. е.

$$\beta_8 = \beta_9 = 1 - e^{-\frac{t_9}{\tau_9}}, \qquad (8.24)$$

отсюда $t_9 = -\tau_9 \ln(1 - \beta_8) = -171{,}57 \ln(1 - 0{,}0033) = 0{,}57$ с – время достижения β_8 на 9-м участке (точка В).

Прибавив к t_9 длительность 9-го участка 0,5 с, рассчитываем степень запечки на 9-м участке:

$\beta_9 = 1 - e^{\frac{-(0{,}57+0{,}5)}{171{,}57}} = 0{,}0062$ – степень запечки в конце 9-го участка (точка С). Далее определяем время, за которое β_9 была бы достигнута при

более высокой температуре на следующей 10-й ступени (точка D, рис. 8.6) $t_{10} = -\ln(1 - \beta_9)\tau_{10} = \ln(1 - 0{,}0062)\cdot 40{,}23 = 0{,}25$ с – время достижения β_9 на 10-м участке.

Прибавив к t_{10} длительность 10-го участка 0,5 с, рассчитываем степень запечки на 10-м участке (точка E): $\beta_{10} = 1 - e^{\frac{-(0{,}25+0{,}5)}{40{,}23}} = 0{,}018$.

В такой же последовательности производится расчет β для всех последующих ступеней температуры (рис. 8.7). Расчетные значения степени запечки по ступеням приведены в табл. 8.7.

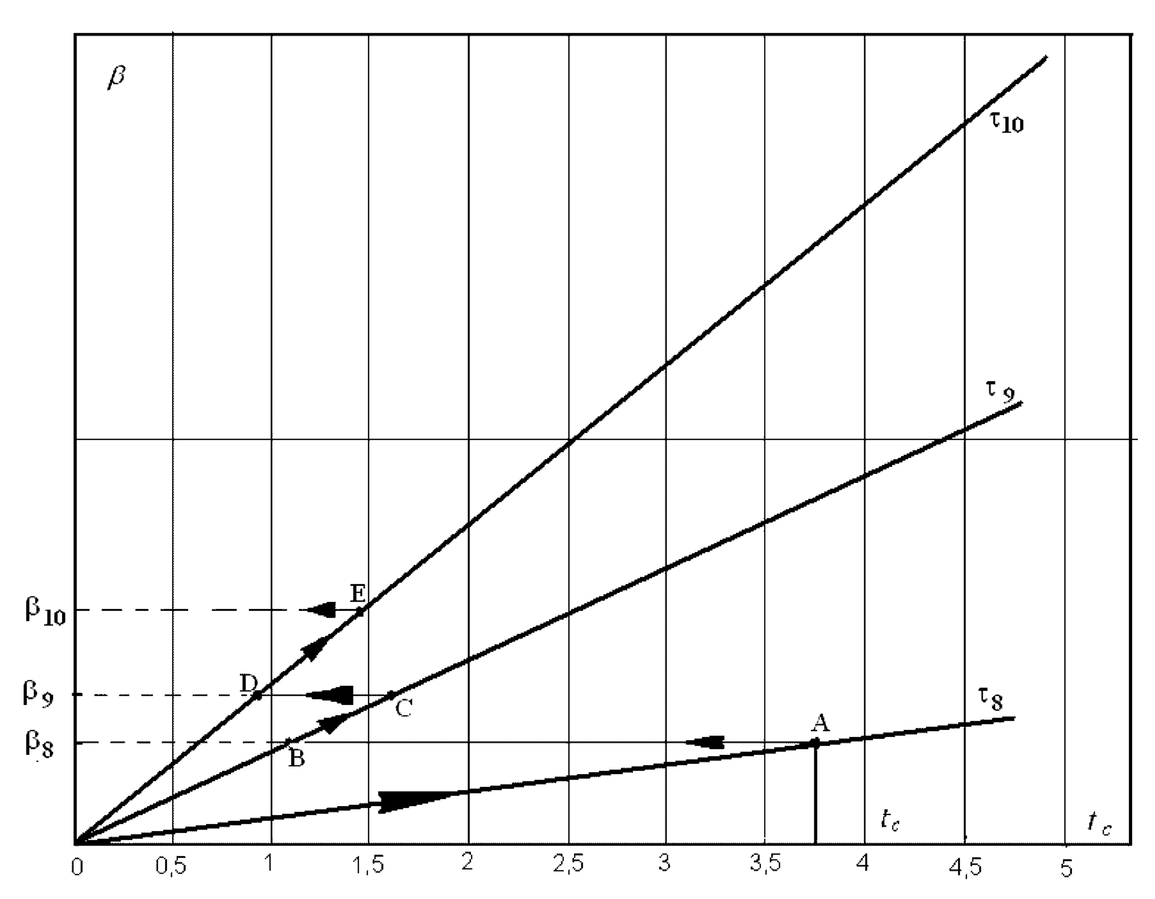


Рис. 8.6. Схема, поясняющая порядок расчета степени запечки эмаль-лака

Таблица 8.7

Расчетные данные степени запечки по ступеням (первый проход)

№ ступени	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Расчетное время запечки t + 0,5 с	3,75	1,07	0,75	0,74	0,78	0,84	1,02	1,7	7,9
Степень запечки β	0,003	0,006	0,018	0,054	0,145	0,324	0,533	0,658	0,682

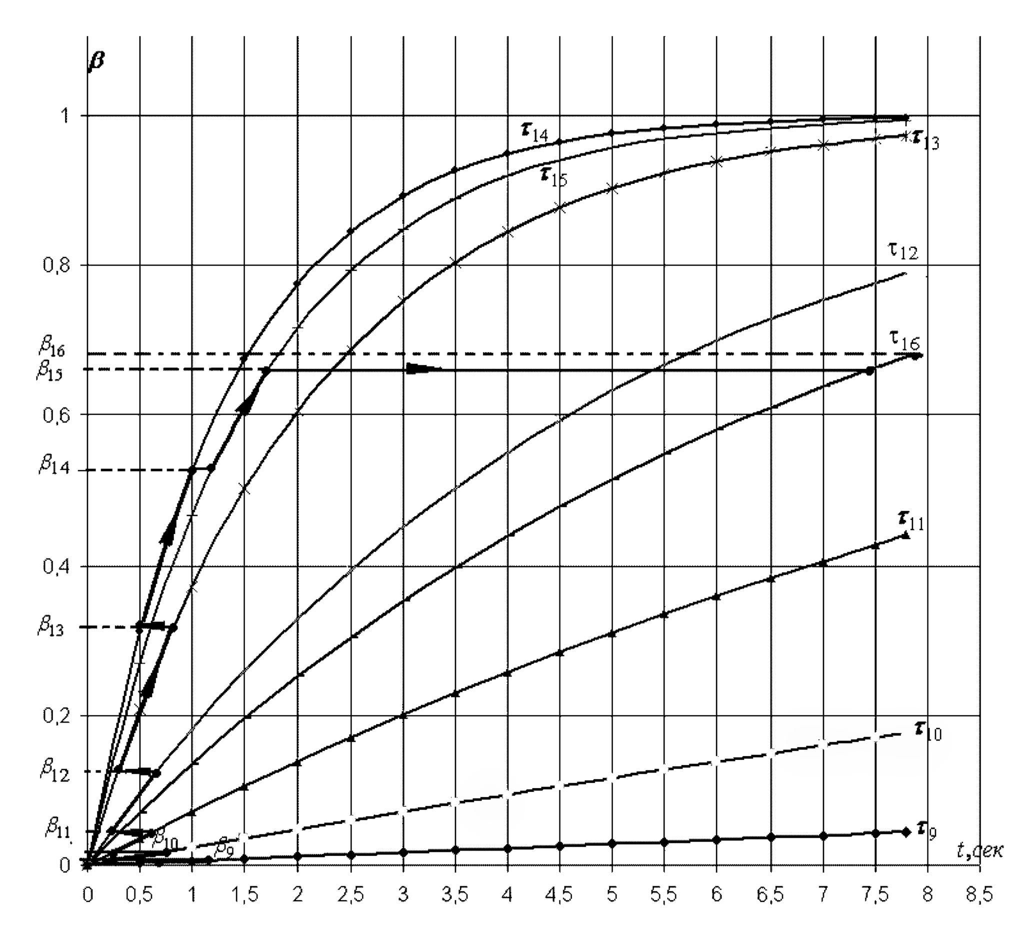


Рис. 8.7. Зависимость степени запечки от времени нахождения провода в печи при различных постоянных значениях температуры $T_{пр}$ по длине печи и соответствующих им значениям постоянных времени химической реакции (∅ 0,56 мм, V = 45 м)

После первого прохода степень запечки изоляции провода составила $\beta = 0{,}682$ (∅ 0,56 мм, $V = 45$ м/мин).

8.5.3. Расчет степени запечки изоляции при последующих проходах провода в печи

После первого прохода провод повторно заходит в печь с тем же распределением температуры по длине печи (рис. 8.8). Оценим степень запечки изоляции провода при втором проходе через печь. После первого прохода степень запечки лака составила $\beta_{16} = 0{,}682$. Из этой точки, лежащей на оси ординат, проводим горизонтальную линию и находим точки пересечения прямой с теми кривыми кинетики химической реакции, у которых степень запечки β на выходе из печи больше, чем β_{16} первого прохода. Эта горизонтальная прямая пересекается с кривыми кинетики химической реакции τ_{12}, τ_{13}, τ_{14}, τ_{15}.

Начинаем расчет степени запечки β с 12-го участка, так как на этом участке самая низкая температура, с которой пересеклась горизонтальная прямая (точка K, рис. 8.8). Расчеты степени запечки проводим, используя методику первого прохода.

Определяем время, за которое β_{16} была бы достигнута при температуре 12-й ступени (рис. 8.8):

$$t_{12}^{2} = -\ln(1-\beta_{16})\tau_{12} = \ln(1-0{,}682)\cdot 4{,}99 = 5{,}7 \text{ с.}$$

Прибавив к t_{12}^{2} длительность 12 участка 0,5 с, рассчитываем степень запечки на 12-м участке после второго прохода (точка L):

$$\beta_{12}^{2} = 1 - e^{\frac{-(5{,}7+0{,}5)}{4{,}99}} = 0{,}711.$$

Определяем время, за которое β_{12}^{2} была бы достигнута при более высокой температуре 13-й ступени:

$$t_{13}^{2} = -\ln(1-\beta_{12}^{2})\tau_{13} = \ln(1-0{,}711)\cdot 2{,}143 = 2{,}66 \text{ с.}$$

Прибавив к t_{13}^{2} длительность 13-го участка 0,5 с, рассчитываем степень запечки на 13-й ступени после второго прохода (точка N):

$$\beta_{13}^{2} = 1 - e^{\frac{-(0{,}5+2{,}66)}{2{,}143}} = 0{,}771.$$

Определяем время, за которое β_{13}^{2} была бы достигнута при более высокой температуре 14-й ступени:

$$t_{14}^{2} = -\ln(1-\beta_{13}^{2})\tau_{14} = \ln(1-0{,}771)\cdot 1{,}339 = 1{,}97 \text{ с.}$$

Прибавив к t_{14}^{2} длительность 14-го участка 0,5 с, рассчитываем степень запечки на 14-й ступени после второго прохода (точка P):

$$\beta_{14}^{2} = 1 - e^{\frac{-(0{,}5+1{,}97)}{1{,}339}} = 0{,}842.$$

Определяем время, за которое β_{14}^{2} была бы достигнута при более низкой температуре 15-й ступени:

$$t_{15}^{2} = -\ln(1-\beta_{14}^{2})\tau_{15} = \ln(1-0{,}842)\cdot 1{,}586 = 2{,}9 \text{ с.}$$

Прибавив к t_{15}^{2} длительность 15-го участка 0,5 с, рассчитываем степень запечки на 15-м участке после второго прохода (точка S):

$$\beta_{15}^{2} = 1 - e^{\frac{-(0{,}5+2{,}9)}{1{,}586}} = 0{,}883.$$

Аналогично рассчитываем последующие проходы (рис. 8.8).

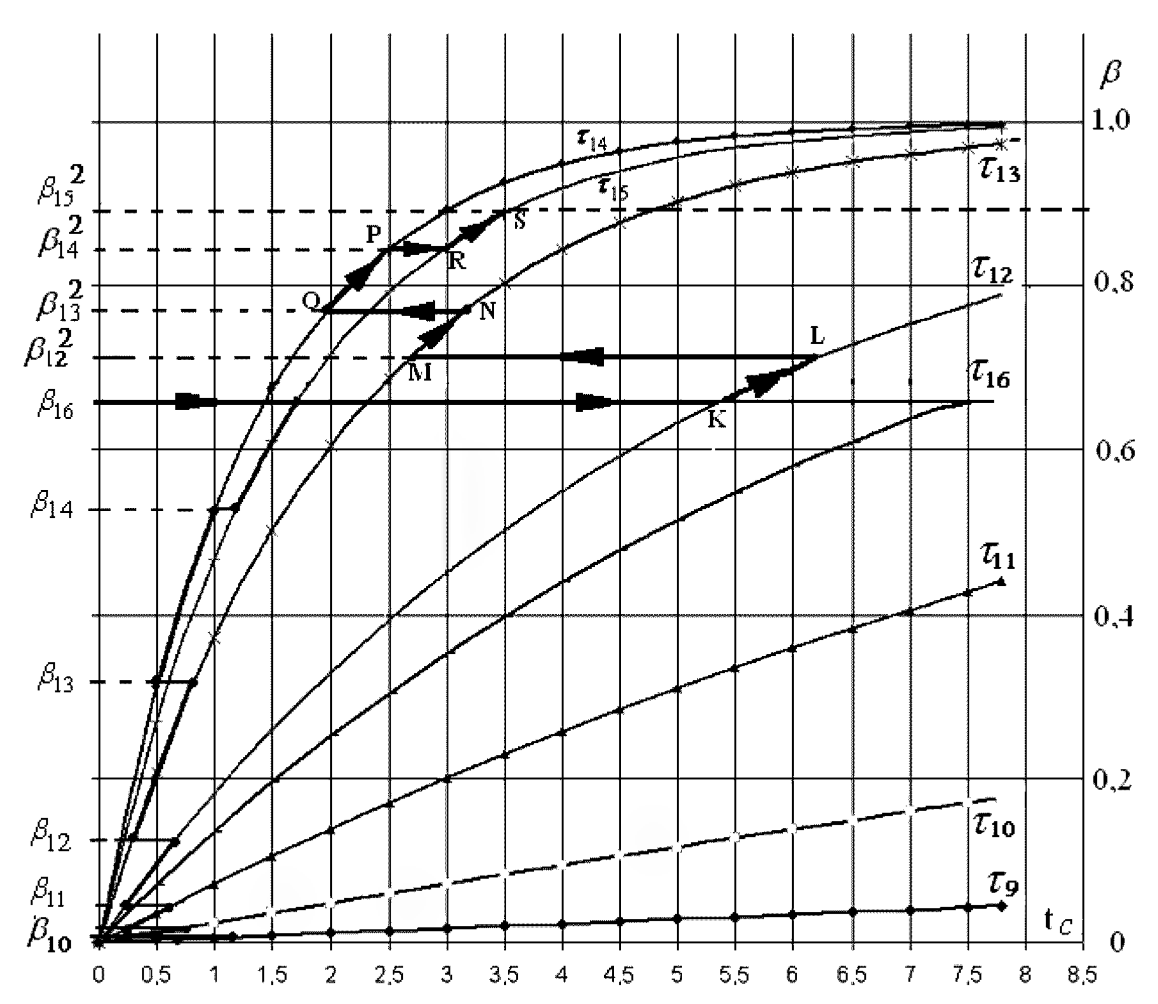


Рис. 8.8. Зависимость степени запечки от времени нахождения провода в печи при различных постоянных времени химической реакции (∅ 0,56 мм, V = 45 м/мин)

Таблица 8.8

Расчетные данные степени запечки по проходам (∅ 0,56 мм, V = 45 м/мин)

Номер прохода	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Степень запечки β	0,68	0,883	0,954	0,982	0,991	0,994	0,996	0,997	0,998

По данным табл. 8.8 строим зависимость степени запечки от номера прохода, рис. 8.9.

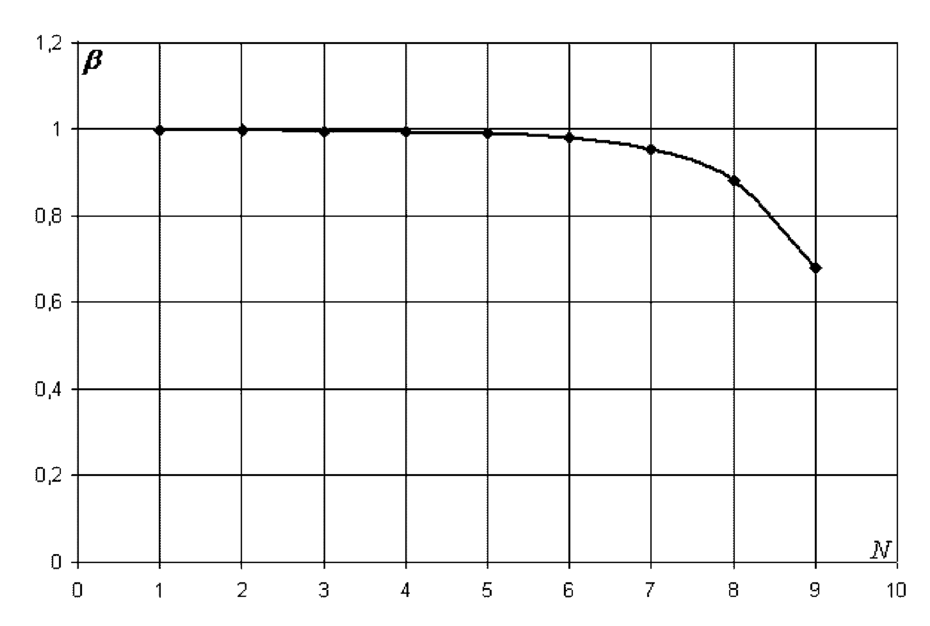


Рис. 8.9. Зависимость степени запечки b от номера слоя (∅ 0,56 мм, V = 45 м/мин)

В результате послойного наложения лака и многократного прохождения слоя через печь на реальном проводе получаем, что наибольшую степень запечки будет иметь первый внутренний слой, а минимальную – наружный слой. Все остальные слои между первым и последним будут иметь промежуточные значения степени запечки. Более жесткие слои находятся внутри, а более эластичные слои находятся снаружи.

8.6. Метод расчета степени запечки изоляции эмаль-проводов по температурной зависимости tgδ

Качество изоляции эмаль-проводов определяется температурно-временным режимом эмалирования, в процессе которого происходит увеличение молекулярного веса полимера и (или) образование пространственной (трехмерной) сетки прочных химических связей между отдельными линейными макромолекулами, что коренным образом меняет физические и химические свойства полимера. Этот процесс приводит к повышению устойчивости полимеров к физическим и химическим воздействиям. Молекулярный вес является одной из важнейших характеристик, определяющих весь комплекс физико-химических свойств полимеров. С увеличением молекулярного веса изменяется не только протяжность молекулярных цепей, но и степень их разветвлен-

ности, тип и размер надмолекулярных структурных образований, плотность упаковки полимерного тела. Типичные изменения свойств полимеров при структурировании заключаются в снижении текучести, эластичности и морозостойкости, повышении температуры стеклования. Температура текучести обычно резко возрастает и уходит за пределы температуры разложения сетки. Температурные границы области высокоэластичности сильно расширяются, что весьма ценно для эластичных полимеров. Прочность полимерной сетки повышается в результате роста энергии взаимодействия между полимерными цепями. Резко снижается растворимость, полимер способен только набухать, причем степень набухания по мере структурирования убывает. Однако излишнее структурирование, приводящее к получению более плотной сетки поперечных связей, вновь сужает область высокоэластичности и может совершенно исключить ее вследствие приближения температуры стеклования к температуре разложения. Увеличение температуры максимума тангенса угла дипольно-сегментальных потерь при увеличении молекулярной массы и (или) его структурировании сопровождается повышением энергии активации и смещением области дипольно-сегментальных потерь полярных высокомолекулярных соединений в сторону более высоких температур. Следовательно, метод диэлектрической релаксации может служить критерием качества запечки изоляции, содержащей в своей структуре полярные группы. Так как величина температуры максимума $\mathrm{tg}\delta$ возрастает с увеличением молекулярного веса полимера, следовательно, при максимальной степени запечки эмаль-пленки она должна достигнуть своего наибольшего значения.

8.7. Температурно-частотные зависимости $\mathrm{tg}\delta$ изоляции провода ПЭФД2-200

Действительно, в полностью запеченной эмаль-пленке температура максимума $\mathrm{tg}\delta$ достигает установившегося значения и при дальнейшей термообработке максимум $\mathrm{tg}\delta$ перестает смещаться в сторону более высоких температур.

Как следует из приведенных зависимостей, в изоляции этого провода диэлектрические потери носят релаксационный характер, рис. 8.10. Для неширокого интервала температур энергия активации диэлектрической релаксации (W) определяется по уравнению

$$W = 2,3k\frac{d\lg f_{\max}}{d(1/T)} = 2,3k\frac{\lg f_2 - \lg f_1}{(1/T_1)-(1/T_2)}, \qquad (8.25)$$

где f_1 и f_2 – частоты, а T_1 и T_2 – температуры, при которых tgδ проходит через максимум. Среднее значение энергии активации для изоляции провода на основе лака МТ-533, рассчитанное по уравнению (8.25), составляет 110,8 кДж/моль.

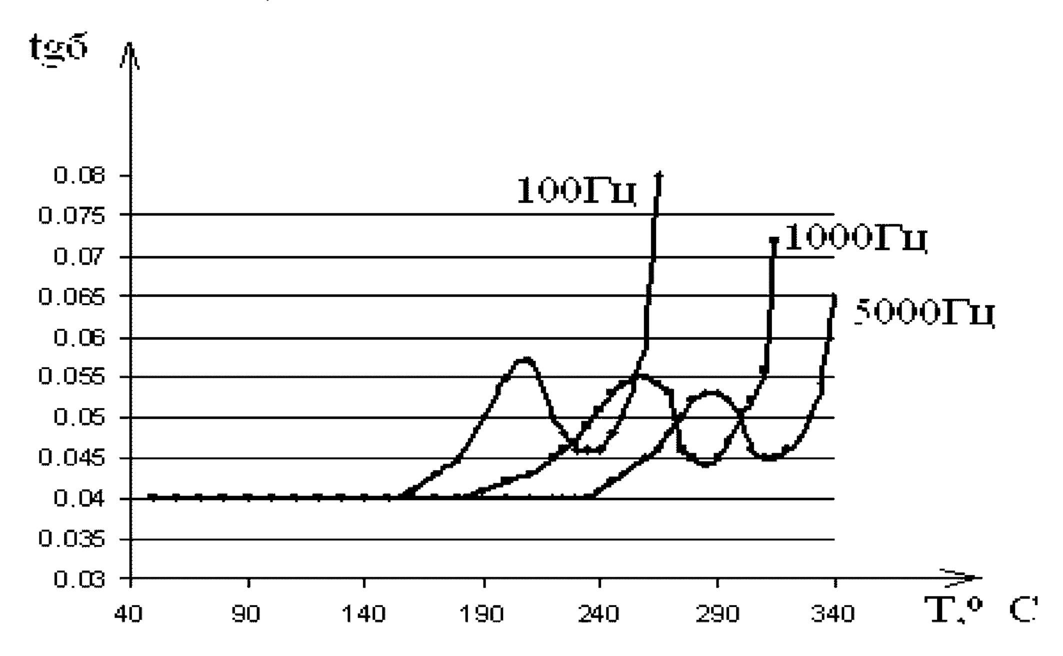


Рис. 8.10. Температурная зависимость tgδ изоляции провода ПЭФД2-200 (диаметр 0,56 мм)

Время релаксации полярных молекул связано с энергией активации следующим выражением:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{W_1}{kT_1}}, \qquad (8.26)$$

где $\tau_0 = 10^{-13}...10^{-14}$ с – период колебаний частицы около положения равновесия; k = 8,31 Дж/К·моль – молярная газовая постоянная.

Согласно данной формуле время релаксации зависит от величины энергии активации. Чем меньше энергия активации диэлектрической релаксации или выше температура, тем меньше время релаксации. С повышением частоты электрического поля температура максимума tgδ, как известно, смещается в сторону более высоких температур (рис. 8.10). В области максимума tgδ частота тепловых колебаний полярных молекул равна частоте приложенного электрического поля. Следовательно, время релаксации τ для двух температур максимума tgδ можно записать в виде

$$\tau_1 = \tau_0 e^{\frac{W_1}{kT_1}} \text{ и } \tau_2 = \tau_0 e^{\frac{W_2}{kT_2}}. \qquad (8.27)$$

Для неширокого интервала температур можно считать, что $W_1 = W_2$, следовательно при $T_2 > T_1$ время релаксации $\tau_1 > \tau_2$.

В случае структурирования полимеров под воздействием внешних факторов подвижность сегментов цепи уменьшается и их время релаксации увеличивается. Следовательно, с повышением степени сшивки полимера температура максимума tgδ будет смещаться в сторону более высоких температур при неизменной частоте приложенного электрического поля, что и наблюдается в процессе запечки изоляции провода ПЭФД2-200. Поскольку максимумы tgδ образцов с разной степенью структурирования проявляются на одной и той же частоте, но при различных температурах, исходя из уравнений (8.27) следует, что $\tau_1 = \tau_2$. Заменив в этом уравнении W_1 и T_1 на $W_x T_x$, а W_2 и T_2 на $W_{уст}$ и $T_{уст}$ соответственно, получим:

$$\frac{W_x}{kT_x} = \frac{W_{уст}}{kT_{уст}}, \text{ то есть } W_x = T_x \frac{W_{уст}}{T_{уст}}, \qquad (8.28)$$

где T_x – текущее значение температуры максимума tgδ; W_x – энергия активации диэлектрической релаксации при этой температуре частично структурированного образца; $T_{уст}$ – установившееся значение температуры максимума tgδ полностью структурированного образца ($\beta = 1$); $W_{уст}$ – энергия активации диэлектрической релаксации при $T_{уст}$ полностью структурированного образца.

Из выражения (8.28) следует, что энергия активации диэлектрической релаксации пропорциональна температуре максимума tgδ и увеличивается с ростом степени завершенности процесса структурирования.

Из экспериментальных данных можно найти установившееся значение температуры максимума tgδ ($T_{уст}$), энергию активации ($W_{уст}$) и, пользуясь выражением (8.28), рассчитать энергию активации для любой другой температуры максимума tgδ и, соответственно, любой степени запечки. Для лака МТ-533 $T_{уст}$ = 270 °С.

Проводя измерения на частоте 1000 Гц, длительность периода приложенного напряжения составляет $\tau = 1/2f = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ с. Такое же время установления диэлектрической релаксации $\tau_{уст}$ наблюдается для максимальной степени запечки при температуре $T_{уст}$. Изоляция эмаль-провода с меньшей степенью запечки будет иметь более низкую температуру максимума tgδ.

Время диэлектрической релаксации τ_x для изоляции провода с любой степенью запечки, при температуре $T_{уст}$, можно рассчитать по выражению

$$\tau_x = \tau_0 e^{\frac{T_x W_{уст}}{KT_{уст}^2}}. \qquad (8.29)$$

Полученное значение $\tau_x \leq \tau_{уст} = 1/2f = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ с.

Исходя из уравнения кинетики химической реакции, степень запечки определяется следующим образом:

$$\beta = C_t / C_0 = 1 - e^{-t/\theta}, \qquad (8.30)$$

где C_0 – количество исходного вещества; C_t – количество вещества, прореагировавшего к моменту времени t; $\theta = \theta_0 e^{E/kT}$ – постоянная времени химической реакции; E – энергия активации химической реакции.

При постоянной температуре химической реакции степень завершенности процесса определяется его длительностью. Поскольку энергия активации химической реакции в 2–3 раза превышает энергию активации диэлектрической релаксации, то постоянная времени химической реакции, например, при температуре 260 °С превышает время диэлектрической релаксации примерно в $10^3 \ldots 10^4$ раз. То есть метод диэлектрической релаксации может служить критерием степени завершенности химической реакции, так как диэлектрическая релаксация, обладая малым временем установления, успевает отслеживать процесс образования поперечных химических связей. Каждой степени сшивки соответствует определенная подвижность цепей макромолекул и соответственно свое время диэлектрической релаксации τ.

Так как время диэлектрической релаксации τ_x целиком определяется глубиной химической реакции и закономерность его изменения определяется параметрами уравнения кинетики химической реакции, то можно записать:

$$\frac{\tau_x}{\tau_{уст}} = \frac{\tau_x}{0{,}5 \cdot 10^{-3}} = 1 - e^{-t/\theta}. \qquad (8.31)$$

Тогда степень завершенности процесса запечки будет равна:

$$\beta = \frac{C_t}{C_0} = 1 - e^{-\frac{t}{\theta}} = \frac{\tau_x}{\tau_{уст}} = \frac{\tau_0 e^{T_x W_{уст} / kT^2_{уст}}}{\tau_0 e^{W_{уст} / kT_{уст}}} = e^{\frac{W_{уст}}{kT_{уст}}\left(\frac{T_x}{T_{уст}} - 1\right)}. \qquad (8.32)$$

Таким образом, по экспериментальной зависимости $\mathrm{tg}\delta = f(T)$ находят значение температуры максимума $\mathrm{tg}\delta$ и рассчитывают степень запечки изоляции.

Глава 9
МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

9.1. Определение геометрических размеров

Определение геометрических размеров производится на образцах проводов, не имеющих механических повреждений и хранившиеся в нормальных условиях. Образцы проводов перед измерением должны быть смотаны с катушки без растяжения и изгибов, а их поверхность должна быть очищена сухим мягким материалом (марля, миткаль).

Геометрические размеры проводов диаметром 0,01 мм и менее определяются микрометром с ценой деления 1 мкм. При проведении измерений микрометр должен находиться на стойке. Измерение диаметра провода или проволоки производится в трех местах образца, находящихся друг от друга на расстоянии не менее 1 м, в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За диаметр принимают среднее значение по шести измерениям. Для измерения размеров провода диаметром свыше 0,010 до 0,020 мм включительно используются микрометры с ценой деления 2 мкм, свыше 0,020 до 0,38 мм включительно – микрометры МК 1-го класса точности. Для измерения круглых проводов диаметром 0,40 мм и выше и проводов прямоугольного сечения применяются микрометры типа МК с ценой деления 0,01 мм. Снятие слоя изоляции с эмалированного провода производят обжигом образца провода в муфельной печи с электрообогревом, в пламени горелки или с помощью химических реактивов. Волокнистая изоляция может удаляться с поверхности проводника механическим способом, если при этом не происходит повреждения проволоки.

Измерения диаметра обмоточных проводов с волокнистой, эмалево-волокнистой и пленочно-волокнистой изоляцией проводятся не менее чем в трех местах на расстоянии не менее 250 мм одно от другого на образце длиной не менее 1 м в двух взаимно перпендикулярных направлениях на каждом измеряемом участке.

При измерении прямоугольных проводов за значение размеров узкой и широкой сторон принимаются средние арифметические значения из трех измерений каждой стороны.

Диаметральная толщина изоляции круглого провода равняется разности между средними арифметическими значениями диаметров провода и проволоки. Овальность проволоки определяется как разность между максимальным и минимальным значениями диаметров в данном сечении проволоки. Удвоенная толщина изоляции прямоугольного провода должна определяться как разность между соответствующими средними арифметическими значениями меньшей или большей стороны провода и меньшей или большей стороны прямоугольной проволоки. Испытания обмоточных проводов обычно проводят при окружающей температуре (25 ± 10) °С и относительной влажности воздуха не более 78 %. В случае если температура и влажность отличаются от указанных, проведение испытаний также допускается, однако при получении неудовлетворительных результатов испытания проводятся повторно и на новых образцах, которые должны предварительно кондиционироваться в течение не менее 6 часов до начала испытаний при (25 ± 10) °С и относительной влажности не более 75 %, и при этих же условиях образцы испытываются. Эти условия относятся и ко всем другим видам испытаний, приведенным ниже.

9.2. Определение относительного удлинения и упругости

Относительное удлинение круглых эмалированных проводов и обмоточных проводов с волокнистой изоляцией определяется на двух образцах (от проверяемой катушки) длиной не менее 250 мм каждый. Измерения производятся на образцах с расчетной длиной 200 мм при скорости растяжения образца не боле 300 мм/мин.

Образцы проводов с бумажной изоляцией испытываются после удаления изоляции. Относительное удлинений проводов со стекловолокнистой и эмалево-стекловолокнистой изоляцией всех размеров и проводов с эмалево-волокнистой изоляцией диаметром до 0,40 мм включительно должны определяться на образцах в изоляции. На образцах проводов с волокнистой или пленочно-волокнистой изоляцией всех размеров и образцах провода с эмалево-волокнистой изоляцией диаметром 0,45 мм и более изоляция должна быть удалена в местах зажима образца.

В случае если разрыв образца произошел в зажимах или на расстоянии от них менее 20 мм и при этом значение относительного удлинения удовлетворяет требованиям документации на обмоточные провода, результаты испытаний считаются действительными.

В случае если результаты испытаний круглых проводов со стекловолокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией не удовлетворяют требованиям техдокументации, то испытание следует повторить на образцах, с которых полностью или частично (в виде полоски по всей длине образца) удалена изоляция; образцы должны быть взяты от тех же катушек и в таком же количестве.

Так как значение относительного удлинения не полностью определяет упругие свойства обмоточных проводов, в настоящее время дополнительно проводятся ***испытания по определению упругости обмоточных проводов по методике МЭК***. Устройство прибора показано на рис. 9.1. Согласно этому методу образец провода длиной 1 м навивают пятью витками вокруг цилиндрического стержня с винтовой канавкой под определенным натяжением. Затем провод освобождают от груза, после чего фиксируется угол отклонения незакрепленного конца провода на циферблате с делениями. Это показание и характеризует упругие свойства провода.

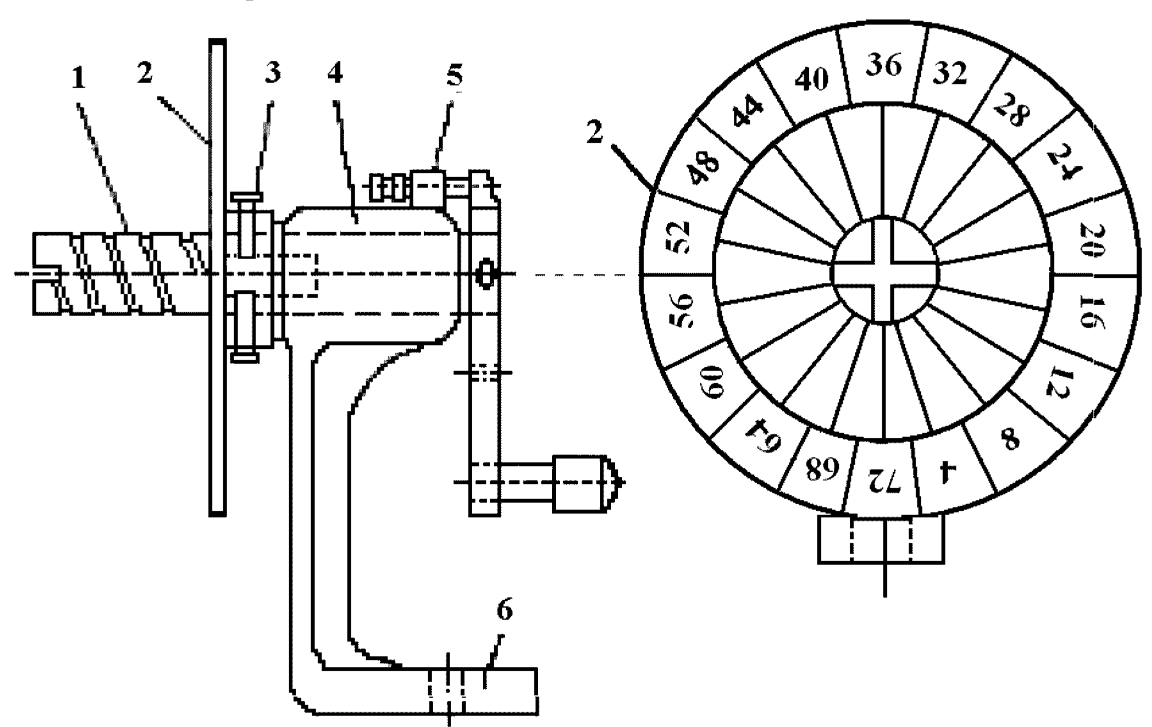


Рис. 9.1. Схема прибора для определения упругости эмалированных проводов:
1 – стержень; 2 – диск; 3 – винт для фиксации стержня;
4 – ось; 5 – защелка; 6 – основание

Цилиндрический стержень устанавливается таким образом, чтобы отверстие для крепления провода, начало винтовой канавки и нулевое положение шкалы находились в вертикальном положении. Шкала прибора разделена на 72°. Вращая рукоятку, на стержень по винтовой канавке навивают пять витков провода. Спираль удерживают на стержне, снимают груз и отрезают провод на расстоянии 25 мм от конца пятого витка провода. Оставшийся конец спирали загибают вертикально вверх в направлении, совпадающем с риской нулевой отметки шкалы.

После этого с левой стороны вертикально загнутого конца спирали устанавливают карандаш и предоставляют спирали возможность медленно, без рывков, раскручиваться. По концу спирали фиксируют угол раскручивания спирали в угловых градусах.

9.3. Определение механической прочности изоляции на истирание

Механическая прочность эмалевой изоляции определяется путем ее истирания стальной иглой диаметром 0,4 мм на скребковом приборе (рис. 9.2).

Игла расположена поперек испытуемого образца провода, прижимается к нему определенным грузом и совершает возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости. Она приводится в движение электродвигателем через эксцентрик. Скорость движения иглы составляет (60 ± 3) двойных ходов в минуту. Длина хода иглы в одном направлении – 10 мм. С одного конца образца, для крепления токоподводящего зажима, на длине 10...15 мм удаляется изоляция и между проводом и иглой подается напряжение переменного или постоянного тока 12 V. В момент истирания изоляции между иглой и жилой провода образуется электрический контакт, и с помощью реле двигатель, приводящий в движение иглу, отключается, одновременно останавливается счетчик числа двойных ходов иглы.

Для проведении испытаний от катушки с проводом отбирают по два образца длиной не менее 200 мм, выпрямленные с удлинением не более 1 %. Испытания на каждом образце провода должны быть проведены в двух местах на расстоянии 100 мм друг от друга, причем на каждом месте в трех точках по окружности (путем последовательного поворота провода на 120° и 240°).

Число двойных ходов иглы до замыкания электрической цепи при разрушении электроизоляционного слоя характеризует механическую прочность покрытия.

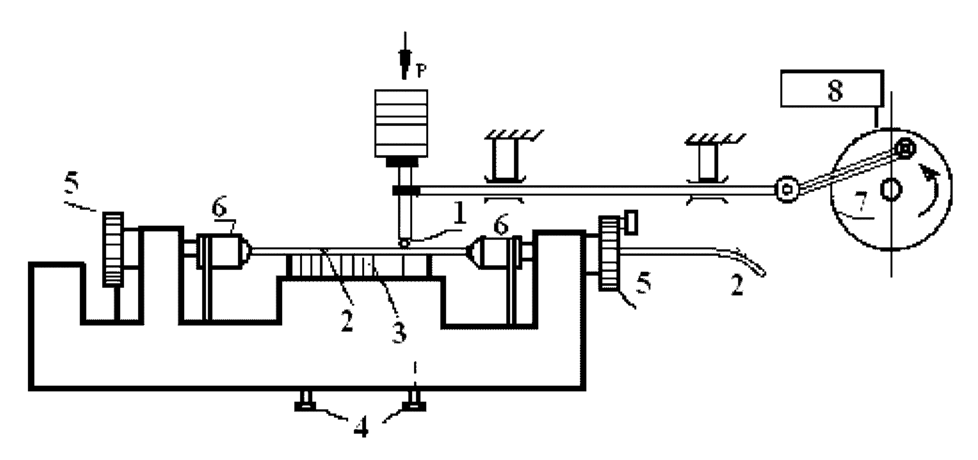


Рис. 9.2. Скребковый прибор для определения механической прочности эмалевой изоляции путем ее истирания стальной иглой:
1 – стальная игла диаметром 0,4 мм; 2 – испытуемый провод;
3 – столик для провода; 4 – регулировка высоты подъема столика;
5 – зажимные колеса для поворота провода на 120° и 240°; 6 – зажимы для провода;
7 – кривошипно-шатунный механизм; 8 – счетчик числа двойных ходов иглы

Среднее значение результатов шести испытаний на двух образцах не должно быть менее значений, указанных в технической документации на провод.

Испытание механической прочности изоляции прямоугольных эмалированных проводов истиранием проводят по большей стороне провода в двух местах на расстоянии не менее 100 мм друг от друга по двум противоположным плоскостям. За механическую прочность принимают среднеарифметическое значение результатов четырех измерений. Значения рекомендуемых нагрузок на иглу для эмалированных проводов диаметром 0,25...2,5 мм и с разной толщиной изоляции составляют от 1,57 до 8,32 Н. При испытании прямоугольных проводов нагрузка на иглу составляет 6,4...8,8 Н.

При испытаниях механической прочности стекловолокнистой, эмалево-волокнистой и дельта-асбестовой изоляции обмоточных проводов, как круглых, так и прямоугольных сечений, также используется метод истирания стальной иглой диаметром 0,4 мм, совершающей возвратно-поступательное движение. Для испытаний отбирается один образец. Скребковый прибор для таких проводов имеет приставку для закрепления образца прямоугольного провода и приспособление для поворота образца на ребро.

Испытание механической прочности изоляции эмалированных проводов диаметром 0,25 мм и выше по методике МЭК проводится на скребковом приборе, принципиальная схема которого приведена на рис. 9.3. Зажимы прибора *10* позволяют легко поворачивать образец на

120° и 240°. С помощью установочных винтов *7* снизу подводится опора для провода *6*. На провод плавно опускается головка скребка *1*, рабочей частью которого служит стальная игла или рояльная проволока диаметром 0,23 мм. Скорость движения скребка составляет 300 мм/мин. Первоначальная нагрузка на скребок составляет 90 % от минимально допустимой, указываемой в технической документации на провод.

При движении иглы по проводу нагрузка на нее равномерно возрастает, причем игла движется в одном направлении. Повреждение изоляции фиксируется в том случае, когда игла полностью соскоблит изоляцию на длине 3 мм. Сигнальная цепь питается постоянным напряжением 6 вольт. В момент остановки скребка зажигается лампа, освещающая цифру, на которую следует умножить первоначальную нагрузку, чтобы получить нагрузку, разрушившую изоляцию. Затем испытания проводят еще 2 раза, поворачивая образец на 120° и 240°.

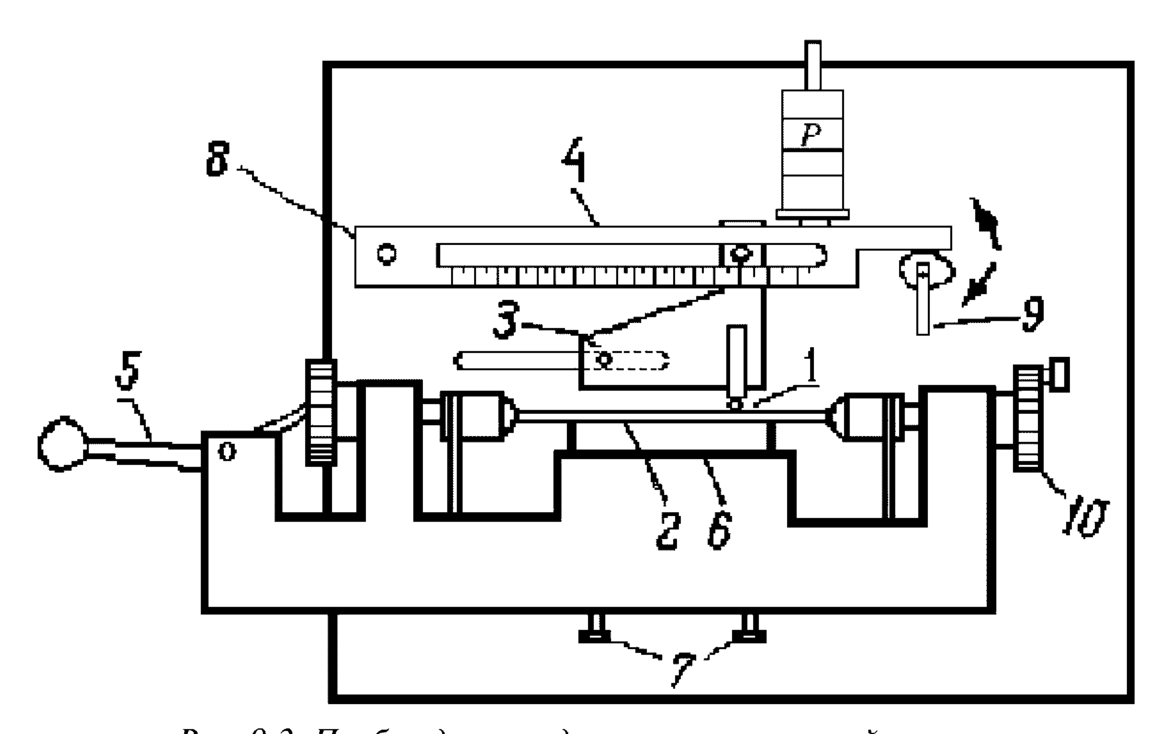


Рис. 9.3. Прибор для определения механической прочности эмалевой изоляции проводов методом истирания иглой при одностороннем движении с увеличивающейся нагрузкой:
1 – стальная игла или проволока; 2 – испытуемый провод; 3 – рама; 4 – устройство для крепления рамы и груза; 5 – рукоятка для выпрямления провода; 6 – опоры; 7 – винты; 8, 9 – элементы устройства, обеспечивающие установку груза и передачу усилия; 10 – зажимное устройство для поворота образца на 120° и 240°

9.4. Определение адгезии

Удлинение эмалевых пленок при растяжении значительно выше, если испытываются провода, а не одни только эмалевые пленки, так как при наличии адгезии к металлу эмалевая пленка в начале испытаний вытягивается вместе с металлом по всей длине испытываемого провода. Чем больше адгезия эмалевой пленки к поверхности пленки, тем выше качество эмалированных проводов. Адгезия эмалевой пленки к проводнику выявляется при растяжении провода. Для определения адгезии эмалевой изоляции применяются два метода: для проводов диаметром 0,05...0,96 мм – растяжения ударной нагрузкой, для проводов диаметром 1,0 мм и более – закручивания проволоки вокруг оси. После растяжения и закручивания не должно наблюдаться растрескивания или отслаивания эмали. Схемы устройств для подобных испытаний проводов приведены на рис. 9.4, 9.5.

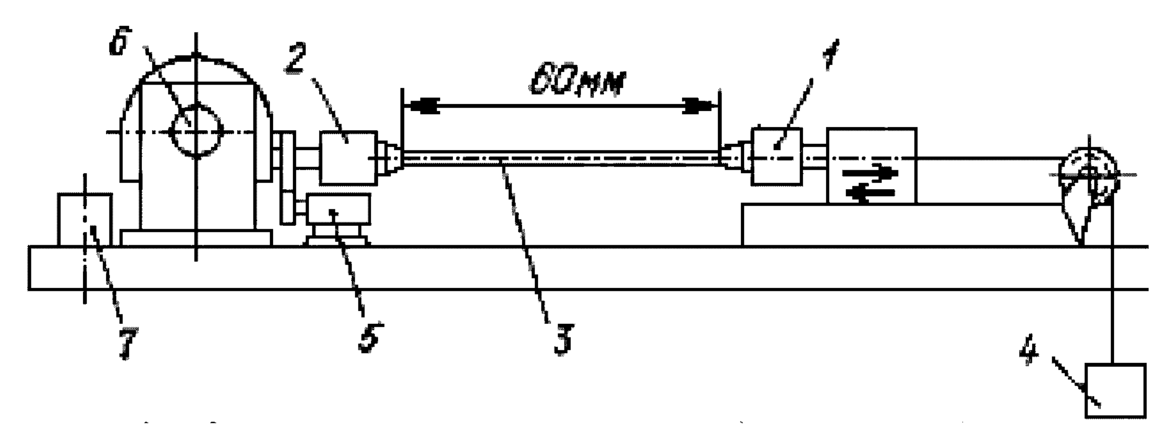


Рис. 9.4. Схема установки для определения адгезии эмалевой пленки кручением:
1 – скользящий зажим; 2 – вращающийся зажим; 3 – образец провода; 4 – нагрузка; 5 – счетчик числа оборотов; 6 – электропривод; 7 – пусковое устройство

Испытание растяжением с помощью ударной нагрузки производят на образцах провода длиной 250 мм. Образец провода должен быть закреплен в зажимах установки и рывком разорван.

Закручивание провода производится со скоростью 60...100 об/мин на длине 50 мм. Образец закрепляется в зажимах, один из которых может вращаться вокруг своей оси, а другой – перемещаться вокруг этой оси. Число закручиваний, которое выдерживает провод без повреждения изоляции, должно соответствовать указанному в технической документации.

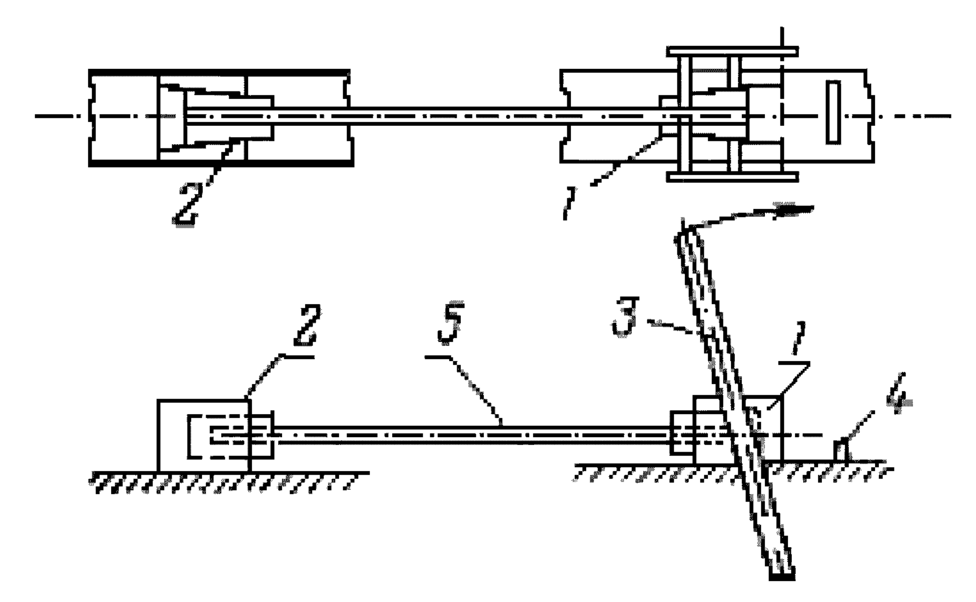


Рис. 9.5. Схема установки для определения адгезии эмалевой пленки рывком:
1 – подвижный зажим; 2 – неподвижный зажим;
3 – рычаг; 4 – стопор; 5 – образец провода

9.5. Определение эластичности и стойкости к тепловому удару

Эластичность эмалевой изоляции определяется несколькими методами. Провода диаметром менее 0,4 мм испытываются на разрывной машине плавным растяжением со скоростью не более 300 мм/мин.

Образец для испытаний имеет длину не менее 250 мм; расчетная длина составляет 200 мм. При этом на эмалевой изоляции не должны появляться трещины или другие дефекты при разрыве провода. Трещины на расстоянии до 2 мм от места разрыва в расчет не принимаются.

Эластичность изоляции проводов диаметром 0,40 мм и более определяют путем навивания 10 витков провода вокруг гладкого цилиндрического стержня определенного диаметра. Длина образца должна быть не менее 500 мм. Для навивания используется станок, схема которого показана на рис. 9.6.

Навивание рекомендуется производить со скоростью не более 600 об/мин для проводов диаметром до 1,0 мм и не более 400 об/мин для проводов диаметром более 1,0 мм. Натяжение при навивании должно примерно соответствовать 4,9 Н/мм^2 для алюминиевых и 9,8 Н/мм^2 для медных проводов и проводов из сплавов сопротивления.

После навивания на поверхности провода не должно быть трещин.

Для определения эластичности прямоугольных эмалированных проводов от каждой катушки берут по три образца длиной от 350 до

550 мм. Допускается проводить испытания на одном образце длиной от 1000 до 1500 мм. Образец провода должен быть изогнут на 180° вокруг стержня по большей или меньшей стороне, в соответствии с требованиями стандартов, в двух местах в двух противоположных направлениях, образуя S-образную форму. Если для испытаний используется образец провода длиной 1000...1500 мм, то он подвергается изгибу в шести местах в двух направлениях. После проведения испытаний на поверхности провода при осмотре не должно быть растрескивания или отслаивания изоляции.

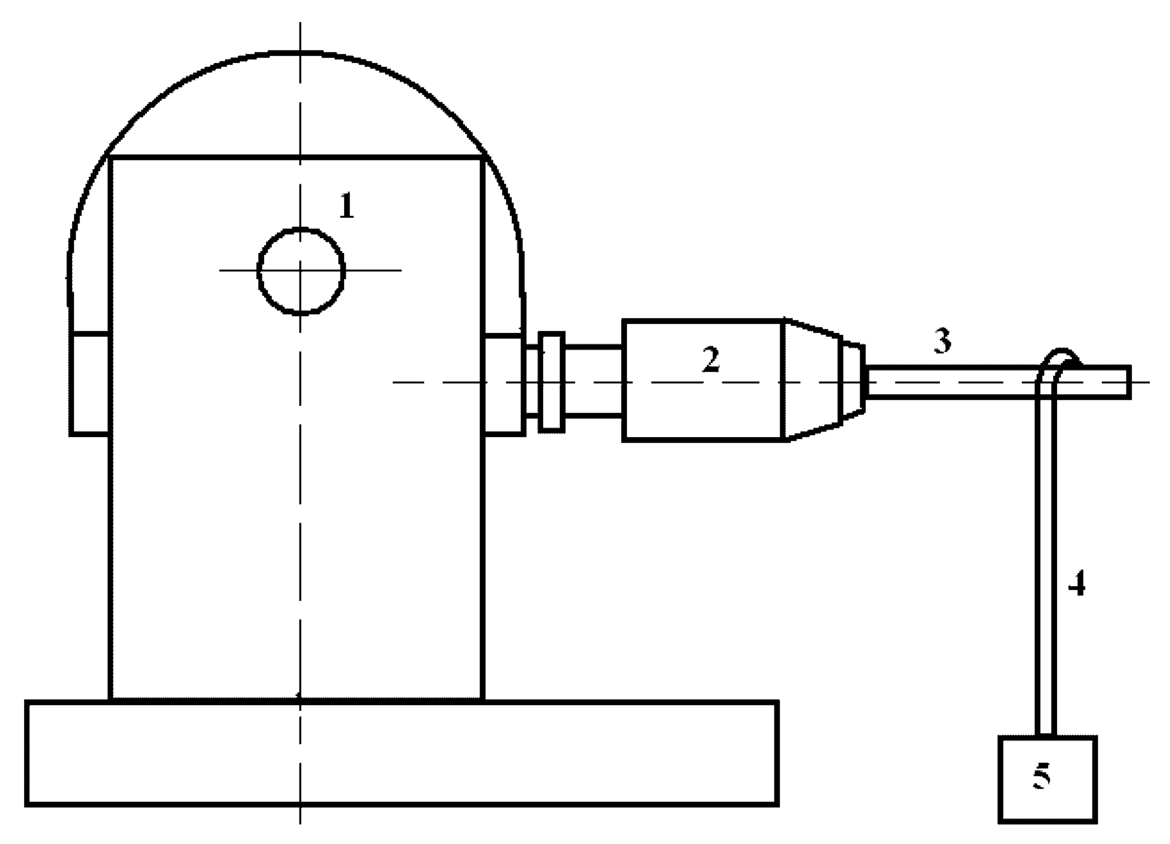


Рис. 9.6. Устройство для навивания проводов:
1 – привод; 2 – подвижный зажим; 3 – стержень; 4 – навиваемый провод; 5 – груз

Эластичность изоляции определяется также после воздействия повышенных температур. Образцы провода в виде прямых отрезков или бухточек диаметром не менее 50 мм для проводов диаметром 0,80 мм и не менее 100 мм для проводов диаметром 0,85 мм и более помещают в термостат с установившейся заданной температурой. Термостат должен иметь автоматическую регулировку температуры с точностью регулирования, указанной в технической документации на провода.

Образцы в термостате должны находиться в подвешенном состоянии и не касаться стенок. Температура и время выдержки в термостате

устанавливаются стандартами или техническими условиями на провода. После изъятия из термостата образцы охлаждают не менее 30 минут до комнатной температуры, а затем подвергают испытанию навиванием на стержень по методу, изложенному выше.

Испытание волокнистой изоляции обмоточных проводов проводится с помощью аналогичных методов. Однако в этом случае следует учитывать ряд особенностей. Так, эластичность волокнистой изоляции круглых проводов диаметром 0,31 мм и менее определяется навиванием на стержень 10 витков, плотно прилегающих друг к другу, в то время как для испытания эмалированных проводов таких размеров применяется метод растяжения провода на разрывной машине. Для проводов с волокнистой изоляцией диаметром более 0,31 мм число навиваемых витков при определении эластичности уменьшается до 5. Эластичность изоляции проводов прямоугольного сечения определяется изгибанием образца провода по широкой стороне в трех местах на 180° вокруг цилиндрического стержня. Наличие повреждений волокнистой изоляции (просветы до токоведущей жилы, разрыв отдельных нитей обмотки, надрывы бумажных лент и т. п.) определяется внешним осмотром без применения увеличительного прибора.

В спорных случаях образцы провода со стекловолокнистой изоляцией должны быть испытаны электрическим напряжением, которое прикладывается между проводником и металлическими шариками, окружающими изоляцию.

Стойкость изоляции эмалированных проводов к тепловому удару определяется путем помещения испытуемого провода, навитого в спирали определенного диаметра, на 30 мин в термостат с заданной температурой. При этом на эмалевой пленке не должны появляться трещины и другие дефекты. Испытанию на тепловой удар подвергаются провода диаметром 0,40...2,50 мм.

При испытании на тепловой удар от катушки с проводом отбираются три образца длиной не менее 500 мм каждый. Навивание спиралей производится на той же установке, которая применяется для изготовления образцов при оценке эластичности изоляции эмалированных проводов. Образец навивается десятью плотно прилегающими друг к другу и стержню витками. При навивании проводов с проволокой диаметром менее 1,0 мм частота вращения стержня должна быть не более 600 об/мин, проводов с проволокой более 1,0 мм – не более 400 об/мин. При навивании не допускается перекручивание провода вокруг своей оси.

9.6. Термопластичность изоляции эмалированных проводов

Для определения термопластичности изоляции эмалированных проводов диаметром 0,14 мм и более применяется следующий метод (рис. 9.7).

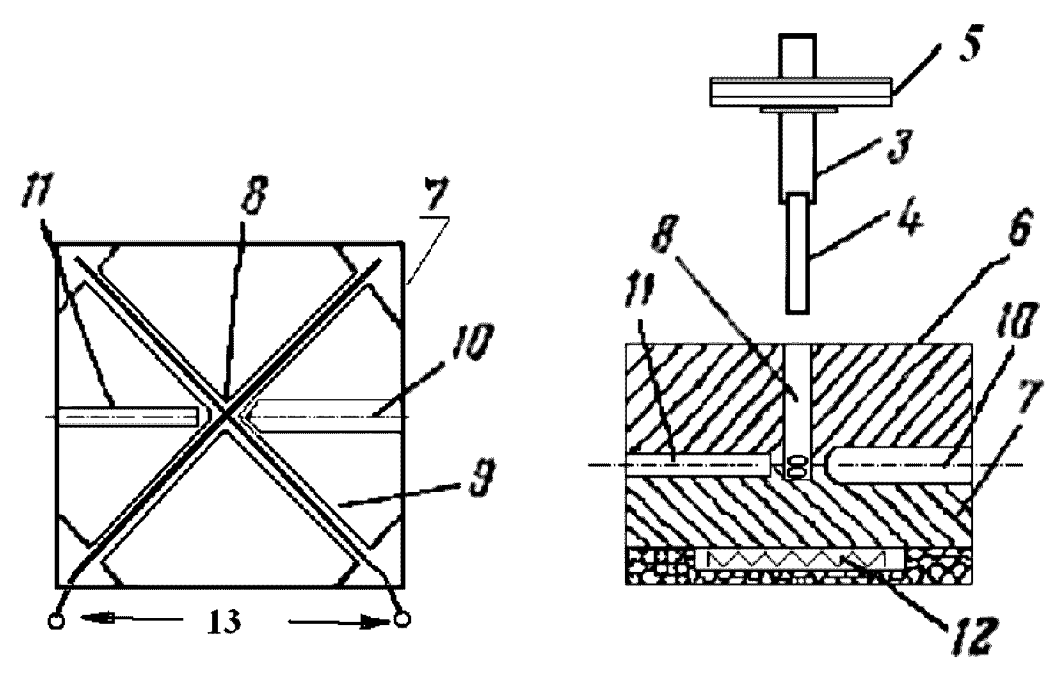


Рис. 9.7. Схема прибора для определения термопластичности изоляции эмалированных проводов на перекрещивающихся проводах:
1, 2 – образцы провода; 3 – стержень; 4 – керамический наконечник; 5 – груз; 6 – верхняя плита; 7 – нижняя плита; 8 – отверстие для стержня; 9 – канавки для образцов провода; 10 – отверстие для терморегулятора; 11 – отверстие для термопары; 12 – нагревательный элемент; 13 – зажимы для крепления образцов и подключения к ним напряжения

Два образца провода, перекрещивающиеся под прямым углом, помещаются в прибор, который устанавливается в термостат. Температура, измеренная вблизи точки пересечения проводов, не должна отличаться от заданной более чем на ±2 °С.

Через некоторое время, необходимое для нагрева образцов до заданной температуры и зависящее от диаметра провода, образцы в точке их пересечения сдавливаются грузом.

Если испытываются провода диаметром менее 0,2 мм, то два образца помещаются рядом параллельно, а третий пересекает их под прямым углом. Между проводами для фиксирования контакта между жилами прикладывается переменное напряжение 100...101 В. Звуковой или световой прибор, сигнализирующий о продавливании изоляции, должен иметь инерционность срабатывания не более 0,15 с.

Длина образца должна быть не менее 150 мм. От испытываемой катушки провода диаметром менее 0,2 мм должно быть отобрано девять образцов, свыше 0,2 мм – шесть образцов. Провод с каждой испытываемой катушки должен быть подвергнут испытанию 3 раза, каждый раз на новых образцах. Общий вид прибора приведен на рис. 9.7. Нагрузка прикладывается к верхнему образцу посредством плавного опускания стержня. Значение нагрузки должно быть равно массе стержня с керамическим наконечником и в зависимости от диаметра испытываемого провода должно составлять 2,16...69,6 Н.

Время выдержки образца при заданной температуре до приложения нагрузки и напряжения должно соответствовать для проводов диаметром от 0,11 до 1,0 мм включительно – 1 мин; от 1,06 до 1,90 мм включительно – 3 мин.

Время до продавливания отсчитывается с момента приложения к образцам нагрузки и напряжения. Образцы считаются выдержавшими испытание, если время до продавливания изоляции не менее 2 мин.

9.7. Определение стойкости эмалевой изоляции к действию агрессивных сред

При проведении испытаний изоляции эмалированных проводов на действие растворителей, масел и воды от испытываемой катушки берут два образца длиной 200 мм, за исключением образцов для испытаний в бензине или в трансформаторном масле, длина которых должна быть 600 мм. При испытании прямоугольных эмалированных проводов используется один образец длиной (100 ± 2) мм (испытание на маслостойкость) или (200 ± 2) мм. После выдержки провода в той или иной жидкости изоляция провода либо подвергается внешнему осмотру, либо испытывается на механическую прочность истиранием или продавливанием. В сосуд с жидкостью должно погружаться не более 10 образцов, причем образцы провода при испытании в бензоле, толуоле, спиртотолуольной смеси и дистиллированной воде должны быть погружены на 2/3 их длины так, чтобы концы с удаленной с них изоляцией были наверху.

Характер подготовки образцов перед погружением их в жидкость, температура испытаний в жидкости и время выдержки в ней, а также метод испытания изоляции после извлечения образцов из жидкости указаны в технической документации на провода.

Испытания на воздействие бензола и толуола должно проводиться на проводах диаметром не менее 0,25 мм. Испытание механической прочности изоляции проводов на истирание после воздействия растворителей проводится на скребковом механизме.

Схема прибора, применяемого для испытания эмалевой изоляции на продавливание после пребывания образцов в бензине или трансформаторном масле, приведена на рис. 9.8.

Один образец провода должен быть изогнут на 180° вокруг штыря нижней пластины, другой – вокруг соседнего штыря и расположен под прямым углом к первому образцу. На образцы, помещенные на нижней пластине, должна быть плавно опущена верхняя пластина, а на нее – груз. Значение нагрузки складывается из массы верхней пластины и груза и должно составлять от 4,9 до 196 Н в зависимости от диаметра провода.

Одновременно с приложением нагрузки к концам проводов, с которых удалена изоляция, должно быть приложено напряжение 10...12 В. После воздействия бензина или трансформаторного масла провод считается выдержавшим испытание, если продавливание изоляции не наступит в течение 30 с.

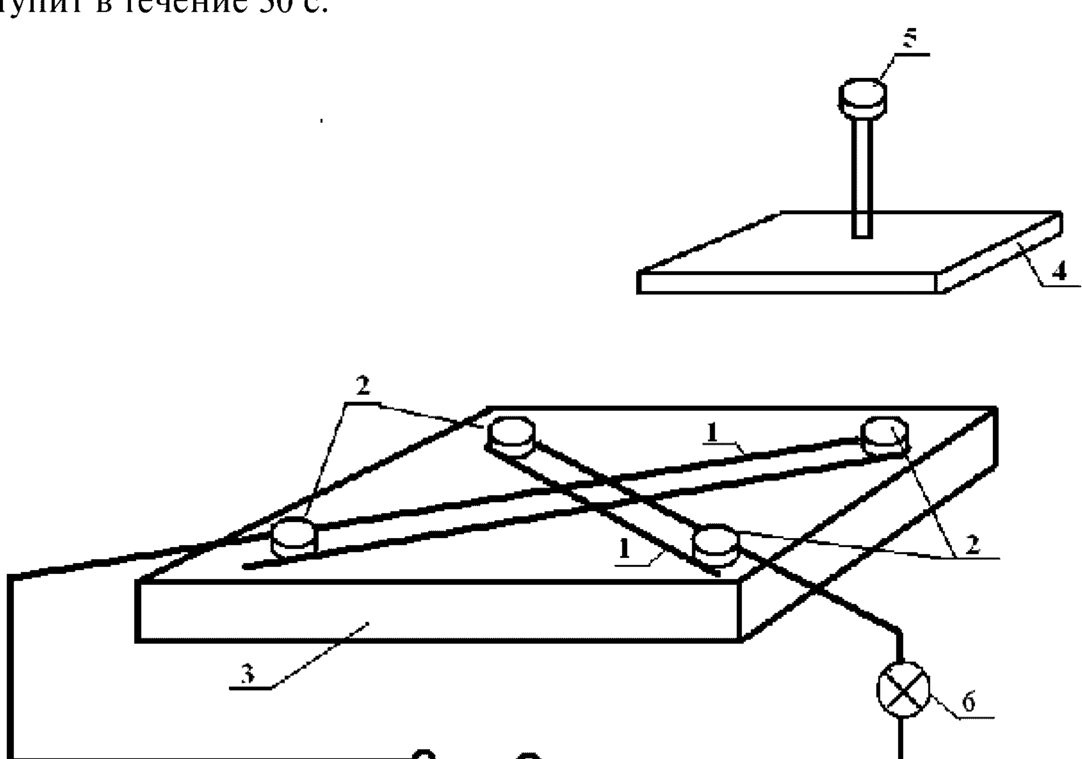


Рис. 9.8. Прибор для продавливания изоляции эмалированных проводов после действия растворителей:
1 – образцы провода; 2 – цилиндрические штыри; 3 – нижняя пластина; 4 – верхняя пластина; 5 – груз; 6 – сигнальная лампа

После испытания в спиртотолуольной смеси или дистиллированной воде оценка состояния изоляции производится внешним осмотром. Так, после действия воды изоляция провода не должна иметь трещин, вздутий и пузырей. После воздействия спиртотолуольной смеси провод не должен изменять внешний вид.

9.8. Испытание изоляции обмоточных проводов высоким напряжением

Одним из важнейших параметров, определяющих качество и работоспособность обмоточных проводов, является пробивное напряжение изоляции. Способ определения пробивного напряжения зависит от диаметра провода и типа его изоляции.

Медные провода с эмалево-волокнистой изоляцией диаметром 0,05...0,29 мм испытываются напряжением на установке, приведенной на рис. 9.9. Установка имеет два металлических полированных ролика *3* диаметром 30 мм, свободно вращающихся на осях. Испытываемый провод сматывается с катушки *1* и, обвивая оба металлических ролика в виде восьмерки, поступает на приемную катушку *2*. Конец провода должен быть зачищен от изоляции и заземлен. Расстояние между центрами роликов – 55 мм. Между металлическими роликами и отдающей катушкой прикладывается нагрузка *P*, создающая натяжение провода, равное 9,8 Н/мм^2.

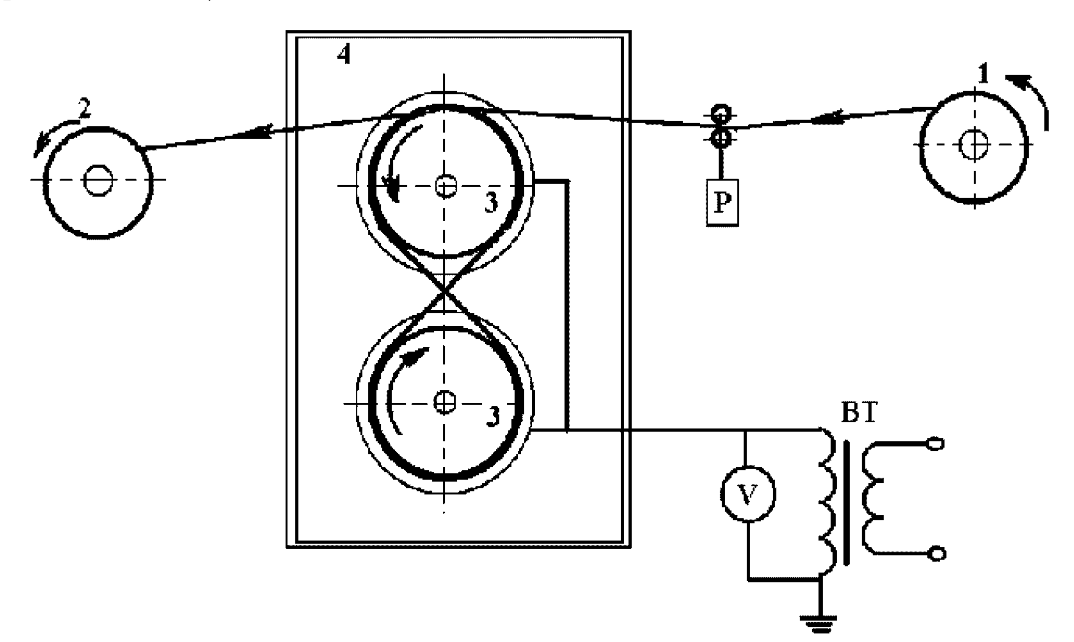


Рис. 9.9. Испытание высоким напряжением на роликах проводов с эмалево-волокнистой изоляцией

Напряжение прикладывается между металлическими роликами и жилой провода и плавно повышается со скоростью примерно 100 В/с до пробоя. Если пробой изоляции наступает ранее чем через 5 с, то скорость подъема напряжения должна быть уменьшена. Если напряжение пробоя равно или превышает 2500 В, то скорость подъема напряжения должна быть примерно 500 В/с.

Для круглых эмалированных проводов с медной проволокой диаметром 0,045 мм и менее должно быть применено устройство, представленное на рис. 9.10, главный элемент которого цилиндр *5* диаметром 25 мм, изготовленный из меди или медных сплавов. Цилиндр расположен горизонтально, свободно вращается на оси и изолирован от корпуса. На второй оси имеется клемма *3* для присоединения зачищенного конца образца. Провод должен обвивать металлический цилиндр одним витком. Один конец провода должен быть очищен от изоляции и присоединен к клемме *3*. Оставшийся после присоединения к клемме провод должен быть обрезан. К другому концу образца провода должна быть приложена нагрузка *6*, создающая натяжение испытываемого провода. Напряжение должно быть приложено между зажимом *3* и металлическим цилиндром *5* и плавно поднято от нуля до пробоя изоляции.

Провод с медной или алюминиевой проволокой диаметром 0,05 мм и более (кроме проводов с эмалево-стекловолокнистой изоляцией) должен быть сложен пополам и скручен на длине 125 мм, как показано на рис. 9.11. Величина нагрузки, прикладываемая к проводу при скручивании, должна быть рассчитана исходя из удельных нагрузок на двойное сечение провода и составлять для медной проволоки 9,8 Н/мм^2, для алюминиевой проволоки 4,9 Н/мм^2. Число скруток, в зависимости от диаметра провода, должно соответствовать указанному в ГОСТ 14340.7–74 – Провода эмалированные круглые. Метод испытания изоляции напряжением.

Петля на конце скрученного образца должна быть разрезана в двух местах (рис. 9.11, *б*). С концов образца на противоположной стороне должна быть удалена изоляция. При испытании с погружением концов провода в отдельные ванны с электролитом снятие изоляции с него не обязательно.

Напряжение должно быть приложено к зачищенным концам скрученного образца или к ваннам с электролитом, установленным на изолирующих подставках, и плавно поднято от нуля до пробоя изоляции. Напряжение плавно повышается со скоростью примерно 100 В/с до пробоя. Если пробой изоляции наступает ранее чем через 5 с, то ско-

рость подъема напряжения должна быть уменьшена. Если напряжение пробоя равно или превышает 2500 В, то скорость подъема напряжения должна быть примерно 500 В/с.

При испытании проводов с проволокой диаметром 0,05 мм и более все пять образцов должны выдержать пробивное напряжение, указанное в стандартах или технических условиях на провода. Если величина пробивного напряжения одного из пяти испытываемых образцов ниже установленного, то испытание повторяют на других пяти образцах, отобранных от той же катушки. Повторное испытание должны выдержать все образцы.

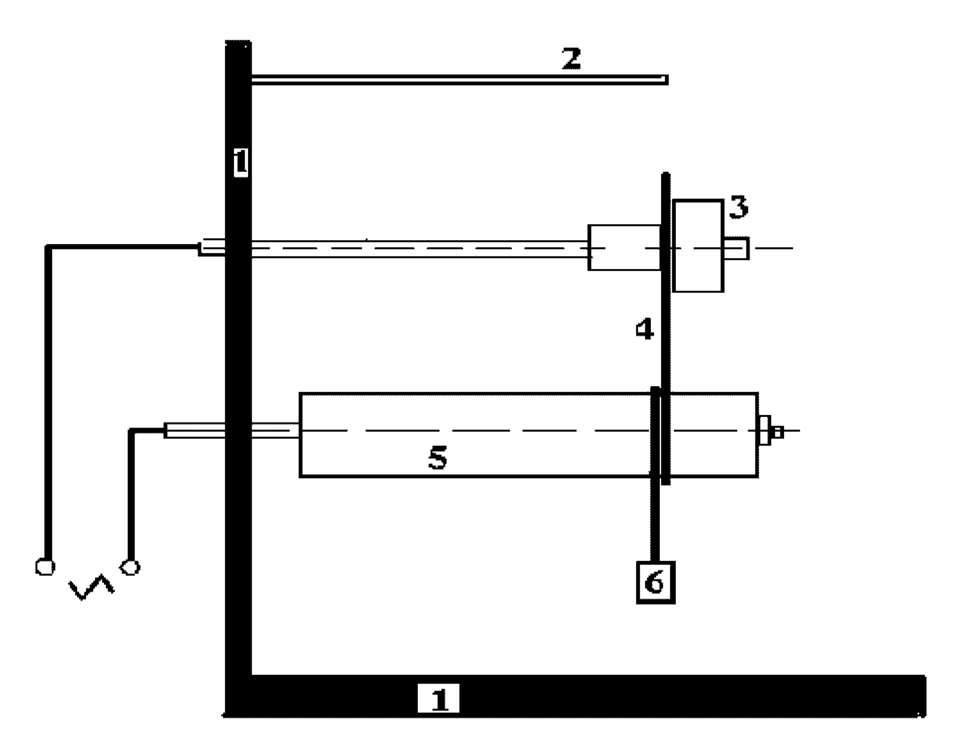


Рис. 9.10. Схема испытания изоляции эмалированных проводов высоким напряжением на гладком цилиндре:
1 – пластина из изоляционного материала; 2 – ось для катушки; 3 – клемма; 4 – испытуемый провод; 5 – металлический цилиндр; 6 – груз

При испытании проводов с проволокой диаметром 0,02...0,045 мм четыре образца из пяти должны выдержать пробивное напряжение, установленное в стандартах или технических условиях на провода. Минимальное пробивное напряжение, которое не выдерживает один из пяти образцов, должно составлять не менее 50 % от установленного в стандартах или технических условиях на провода.

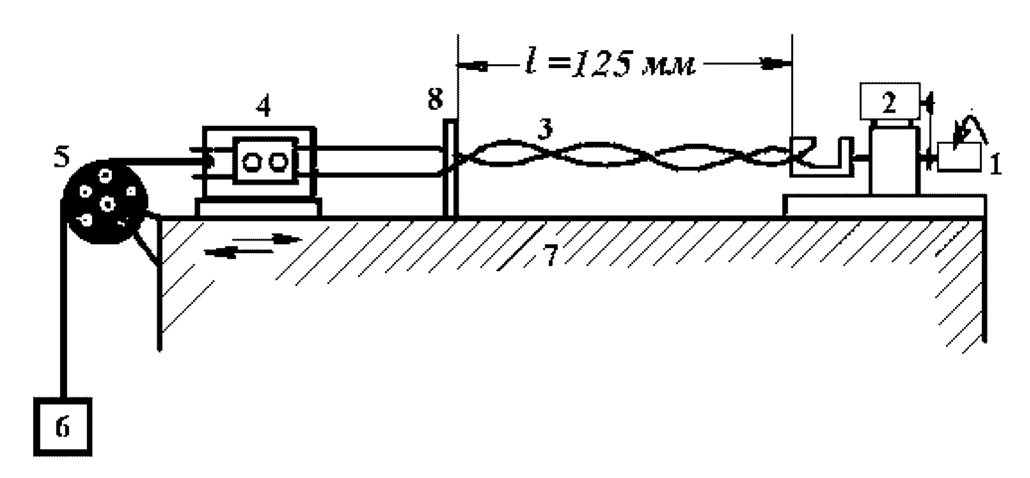


Рис. 9.11. Схема изготовления скрутки для испытания на пробивное напряжение:
1 – электропривод; 2 – счетчик числа оборотов; 3 – скручиваемый провод; 4 – скользящий зажим; 5 – шкив; 6 – груз; 7 – стол

При испытании круглых проводов диаметром более 2,50 мм и проводов прямоугольного сечения они располагаются параллельно и плотно прижимаются друг к другу (прямоугольного сечения – большой стороной), рис. 9.12. Длина образца провода *1* должна быть не менее 500 мм. На длине 200 мм они скрепляются обмоткой из изоляционной ленты *3* или другим способом, обеспечивающим плотное прилегание друг к другу испытываемых отрезков проводов. Концы отрезков разводятся в противоположные стороны и отделяются друг от друга изоляционной прокладкой *2* толщиной не более 0,2 мм.

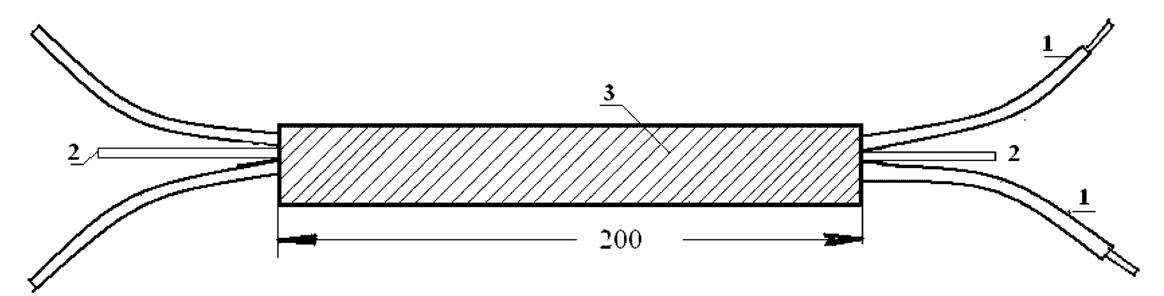


Рис. 9.12. Образец провода круглого сечения диаметром более 2,50 мм или прямоугольного сечения для испытания высоким напряжением:
1 – отрезки проводов; 2 – изоляционная прокладка; 3 – обмотка изоляционной лентой

Определение числа точечных повреждений производится в изоляции эмалированных проводов диаметром 0,02...0,35 мм. Для этого испытания применяется прибор, вариант принципиальной схемы которого приведен на рис. 9.13. Образец провода длиной 15 м пропускают через влажный контакт прибора (ВК) со скоростью 25...30 м/мин.

Влажный контакт, обжимающий провод на участке длиной (20 ± 2) мм, состоит из фетра, опущенного в ванночку с подсоленной водой. Напряжение, приложенное между жилой провода и влажным контактом, составляет (60 ± 3) В постоянного тока. К проводу присоединяют положительный полюс источника тока, к влажному контакту – отрицательный.

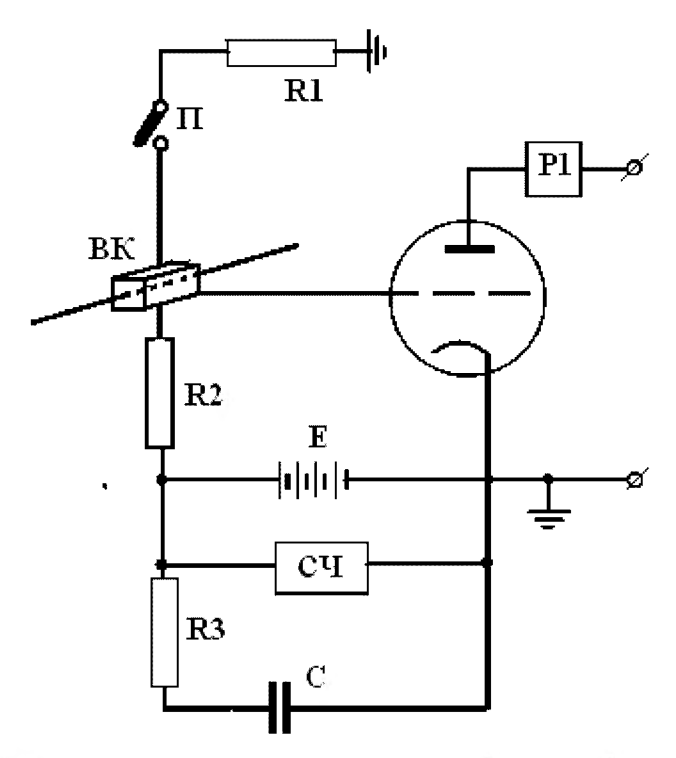


Рис. 9.13. Принципиальная схема прибора для определения точечных повреждений эмалевой изоляции

Значение тока, проходящего через место повреждения изоляции и проволоку, не должно превышать 1 мА. Счетчик числа повреждений (СЧ) срабатывает при сопротивлении изоляции (2...3)$\cdot10^5$ Ом и обеспечивает регистрацию не менее 10...12 точечных повреждений в секунду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешков И.Б. Обмоточные провода: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
2. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханова И.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна. – М.: Химия, 1986. – 160 с.
3. Астахин В.В., Трезвов В.В. и др. Электроизоляционные лаки. – М.: Химия, 1981. – 216 с.
4. Дринберг С.А., Ицко Г.Ф. Растворители для лакокрасочных материалов. – Л.: Химия, 1980. – 160 с.
5. Кабыстин Г.О. Обмоточные провода с волокнистой изоляцией и технология их производства. – М.: Энергия, 1976. – 173 с.
6. Майофис И.М. Химия диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1970. – 332 с.
7. Гладков А.З. Электроизоляционные лаки и компаунды. – М.: Энергия, 1973. – 247 с.
8. Макиенко Г.П. Кабели и провода, применяемые в нефтегазовой индустрии. – Пермь: Агентство «Стиль–МГ», 2004. – 560 с.
9. Пешков Н.Б., Белорусов Н.И. и др. Производство кабелей и проводов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 632 с.
10. Городецкий С.С., Лакерник Р.М. Испытания кабелей и проводов. – М.: Энергия, 1971. – 272 с.
11. Холодный С.Д. Технологическая термообработка изоляции кабелей и проводов. – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 160 с.
12. Холодный С.Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
13. Холодный С.Д. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов технологии обработки изоляции кабелей и проводов с целью интенсификации производства и повышения их качества: Автореф. дис. ... докт. тех. наук. – Москва, 1979.
14. Трезвов В.В. и др. Электроизоляционные лаки для эмалированных проводов // Кабели и провода. – 2001. – № 4. – С. 8–9.
15. Пивненко В.Т. Перспективы развития производства эмалированных проводов // Кабели и провода. – 2001. – № 2. – С. 3–5.

16. Биржин А.П., Евтушенко Ю.М. и др. Новое поколение лаков для эмалирования проводов // Наука и техника. – 2005. – № 6. – С. 25–27.
17. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники: учебник для вузов / под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 432 с.
18. Петров А.В., Дзюбань Г.Н., Елисеева О.Н. Расчет диаметра калибров для эмалирования проволоки // Кабель-news. – 2009. – № 8. – С. 57–60.
19. Петров А.В. Метод оценки степени запечки изоляции провода ПЭФД2-200 по температурной зависимости tgδ // Кабель-news. – 2009. – № 10. – С. 52–55.
20. Петров А.В. Основные положения к расчету калибров для эмалирования проволоки // Кабели и провода. – 2009. – № 6. – С. 12–15.
21. ГОСТ 14340.1–74. Провода эмалированные круглые. Метод измерения диаметров проволоки и проводов. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 2.
22. ГОСТ 15634.0–70. Провода обмоточные с волокнистой, эмалево-волокнистой и пленочно-волокнистой изоляцией. Метод определения геометрических размеров. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – С. 5.
23. ГОСТ 14340.2–74. Провода эмалированные круглые. Метод испытания на адгезию. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 3.
24. ГОСТ 14340.7–74. Провода эмалированные круглые. Метод испытания изоляции напряжением. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 5.
25. ГОСТ 14340.8–74. Провода эмалированные круглые. Методы испытаний стойкости изоляции к воздействию растворителей, масла и воды. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 4.
26. ГОСТ 14340.10–74. Провода эмалированные круглые. Метод испытаний механической прочности изоляции на истирание. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 6.
27. ГОСТ 14340.74. Провода эмалированные круглые. Метод определения термопластичности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 2.
28. ГОСТ 14340.13–82. Провода эмалированные круглые. Метод определения упругости. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – С. 4.
29. ГОСТ 14340.14–83. Провода эмалированные круглые. Метод определения числа точечных повреждений. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – С. 5.
30. ГОСТ 14340.3–74. Провода эмалированные круглые. Метод испытания изоляции на эластичность. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – С. 4.

Учебное издание

АНИКЕЕНКО Владимир Михайлович
ЛЕОНОВ Андрей Петрович
ПЕТРОВ Александр Васильевич

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Учебное пособие

Научный редактор
кандидат наук, доцент А.Н. Дудкин

Выпускающий редактор *Т.С. Савенкова*
Редактор *Д.В. Заремба*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати xx.xx.2010. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 11,05. Уч.-изд. л. 9,99.
Заказ xxx-10. Тираж 100 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет



Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Тел./факс: 8(3822) 56-35-35, www.tpu.ru